



**Universidad
Zaragoza**



Máster en Geología: Técnicas y Aplicaciones

Aplicación de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética al estudio de la cinemática del cabalgamiento de Monroyo

TRABAJO FIN DE MÁSTER



Eva Vernet Tarragó
Director: Antonio Casas Sáinz

Diciembre del 2016

ÍNDICE

1. Resumen.....	1
2. Abstract.....	2
3. Introducción y objetivos.....	3
4. Situación geográfica y geológica.....	5
4.1 Situación geográfica.....	5
4.2 Contexto geológico regional.....	6
4.3 Sector de Torre de Arcas.....	9
5. Metodología.....	11
5.1 Toma de muestras.....	11
5.2 Anisotropía de la susceptibilidad magnética.....	13
5.3 Curvas termomagnéticas.....	14
5.4 Láminas delgadas.....	15
5.5 Difracción de rayos X.....	16
5.6 Análisis estructural.....	17
6. Resultados.....	18
6.1 Análisis estructural.....	18
6.1.1 Barranco de Entreflor.....	18
6.1.2 Afloramiento del cabalgamiento de Monroyo.....	20
6.2 Anisotropía de la susceptibilidad magnética.....	24
6.3 Mineralogía portadora de la fábrica magnética magnética.....	30
6.3.1 Curvas termomagnéticas.....	30
6.3.2 Difracción de rayos X.....	34
6.3.3 Láminas delgadas.....	34
7. Interpretación y discusión.....	38
7.1 Interpretación de la mineralogía portadora de la fábrica magnética.....	38
7.2 Orientación de foliación y lineación.....	41
8. Conclusiones.....	45
9. Bibliografía.....	46

1. RESUMEN

En el presente trabajo se ha aplicado la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética (ASM) al estudio de una zona de falla como indicador cinemático. Esta zona de falla se trata de un cabalgamiento que pone en contacto materiales cretácicos sobre cenozoicos. A este cabalgamiento se le ha nombrado como cabalgamiento de Monroyo.

El objetivo de este trabajo es interpretar foliaciones y lineaciones generadas por al deformarse la roca durante un evento tectónico mediante la combinación de los resultados obtenidos de la fábrica magnética y el análisis estructural. Se ha determinado que la dirección de las estructuras es ENE-WSW y la del transporte tectónico es NNE, lo cual concuerda con la historia geológica de la zona.

Adicionalmente, se han realizado varios análisis para identificar la mineralogía responsable de la fábrica magnética, como curvas termomagnéticas, difracción de rayos X (DRX) y también la observación en el microscopio de láminas delgadas. Aparentemente, la mineralogía magnética tiene aportación de la fase ferromagnética, por la presencia de óxidos de hierro observados en lámina delgada, y de la fase paramagnética, representada por los filosilicatos identificados mediante las curvas termomagnéticas y la DRX.

2. ABSTRACT

In the present work, Anisotropy of Magnetic Susceptibility has been applied in a fault zone as a kinematic indicator. This fault zone is a thrust which places cretaceous materials over the Cenozoic. The studied fault has been named as Monroyo thrust.

The goal of this paper is to interpret magnetic foliation and lineation resulting from a tectonic event combining the results of the magnetic fabric with structural analysis. The direction of the structures is ENE-WSW and the direction of tectonic transport is NNE. These results agree with the geological history of the area.

In addition, several analyses have been carried out in order to identify the mineralogy of the magnetic fabric, such as thermomagnetic curves, X-ray diffraction (XRD), and also observations of thin sections. Apparently, the magnetic mineralogy of the magnetic fabric is constituted by ferromagnetic phase (iron oxides observed in thin sections) and paramagnetic phase (clay minerals identified in termomagnetic curves and XRD).

3. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética (ASM) trata la variabilidad espacial de la susceptibilidad magnética, siendo esta última una propiedad tensorial que depende del grado de magnetización de un material ante la presencia de un campo magnético externo. La disposición de los minerales magnéticos puede ser primaria, aquella que adquieren los minerales en el momento de depositarse en el caso de las rocas sedimentarias; o secundaria, cuando esta fábrica primaria es modificada al ser sometida la roca a deformaciones que generan lineaciones y foliaciones (Dinarès et al., 1992; Parés et al., 2002).

La Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética es la herramienta utilizada para el análisis de la fábrica magnética de las rocas y de las deformaciones a las que estas han sido sometidas. Se representa geométricamente mediante un elipsoide con ejes K1, K2 y K3 que representan respectivamente el eje máximo, intermedio y mínimo del tensor de la susceptibilidad magnética. Las relaciones geométricas entre ellos determinan las orientaciones de la fábrica magnética: el eje máximo (K1) es paralelo a la lineación magnética, mientras que el eje mínimo (K3) es perpendicular a la foliación magnética (Hrouda, 1982; Borradaile et al., 1996). Es importante contrastar esta información con observaciones a escala de afloramiento y microscópica ya que en función de la deformación, el elipsoide de susceptibilidad magnética adquiere diferentes orientaciones (Tarling et al., 1993).

El valor de la susceptibilidad magnética varía para cada material, pudiéndose clasificar tres importantes grupos en función de su comportamiento magnético: diamagnéticos (como la calcita y el cuarzo), que presentan una susceptibilidad magnética negativa pero muy débil; paramagnéticos (principalmente filosilicatos), cuyo valor de susceptibilidad es positivo aunque relativamente bajo, y ferromagnéticos, característicos por presentar susceptibilidades muy altas. Los resultados de la ASM obtenidos van a ser el total de todos estos componentes, aunque se considera que las fases magnéticas que van a aportar susceptibilidad magnética a la roca van a ser únicamente las paramagnéticas y ferromagnéticas. Es por esto que es especialmente importante conocer la mineralogía responsable de la fábrica magnética presente en los materiales estudiados. Para ello, se ha contrastado la información obtenida de curvas

termomagnéticas con difracción de rayos X (DRX) y observaciones en láminas delgadas.

Mediante la aplicación de la ASM en la zona de falla del cabalgamiento de Monroyo y con la combinación de diversos métodos, se pretende responder las siguientes cuestiones, que corresponden a los objetivos del presente trabajo:

- Conocer la mineralogía portadora de la fábrica magnética de los materiales estudiados.
- Determinar las relaciones geométricas entre los resultados de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética y la cinemática del cabalgamiento.
- Estudiar una posible gradación de la fábrica magnética a lo largo de la zona de falla.
- Interpretar y discutir los resultados obtenidos mediante el análisis estructural y la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética

4. SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA

4.1 Situación geográfica

En este trabajo se ha estudiado un cabalgamiento que aflora en un talud situado en el kilómetro 86 de la carretera N-232 en dirección Vinaroz. Este afloramiento se sitúa a aproximadamente 5,5 km al Sur de la población de Monroyo. La zona pertenece al término de Torre de Arcas, que se encuentra en la comarca del Matarraña, al NE de la provincia de Teruel (dentro de la Comunidad Autónoma de Aragón y a escasos kilómetros de la Comunidad Valenciana), como se encuentra indicado en la figura 1 A. Las coordenadas geográficas de este afloramiento son $40^{\circ}44'26.7''\text{N}$, $0^{\circ}03'33.9''\text{W}$ y se encuentra a aproximadamente 800 m.s.n.m.

Debido a las características de la zona y a la escasez de afloramientos del cabalgamiento (a partir de ahora cabalgamiento de Monroyo), la cartografía y el análisis estructural para este trabajo fueron realizados en un barranco próximo, conocido como el barranco de Entreflor, el cual se encuentra a 1 km al Este del afloramiento estudiado. A este barranco se accede por un camino situado el kilómetro 87 de la carretera N-232 (Figura 1.B).

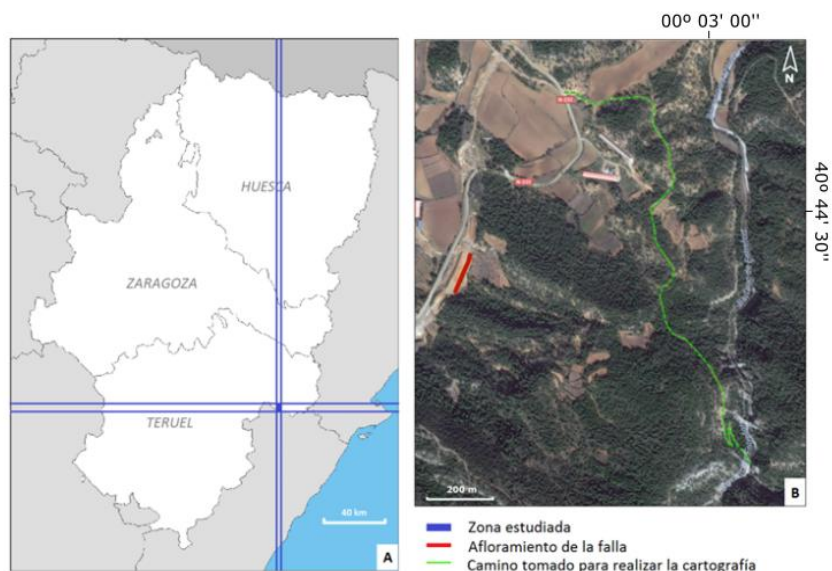


Figura 1. A: Mapa de la situación de la zona de estudio dentro de la Comunidad Autónoma de Aragón. (Modificada de <http://d-maps.com/>). B: Situación geográfica del afloramiento del cabalgamiento de Monroyo y de la zona cartografiada. (Tomada de <http://maps.google.es>).

4.2 Contexto geológico regional

En cuanto al contexto geológico regional, este trabajo se encuentra situado en la zona de enlace de dos grandes unidades geológicas; la Cordillera Ibérica y la Cordillera Costero Catalana (Figura 2). La zona de enlace es la transición de la parte oriental de la Cordillera Ibérica y la occidental de la Cordillera Costero Catalana. Por ello, las direcciones de las estructuras principales son NW-SE en la parte Oeste de la zona de enlace, E-W en la parte central y NE-SW en la parte Este (González, 1989). Esta zona se encuentra considerablemente más deformada que las áreas circundantes, encontrándose en ella un gran desarrollo de cabalgamientos y pliegues.

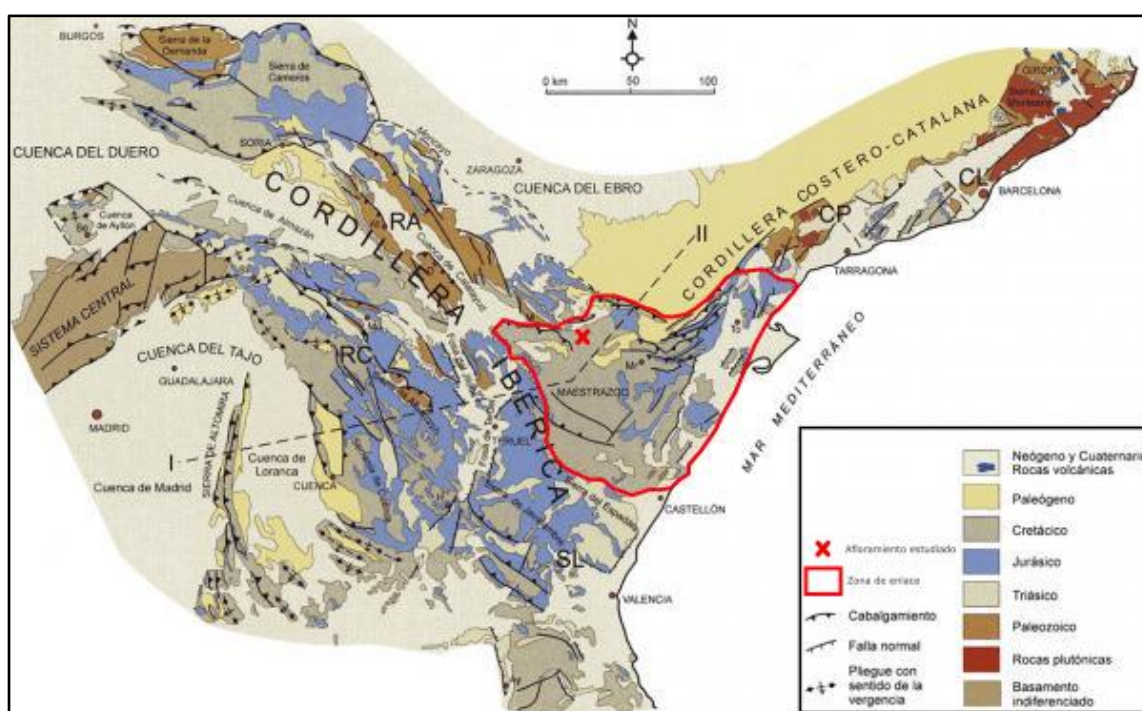


Figura 2. Mapa geológico de la Cordillera Ibérica con la zona de enlace encuadrada y la localización del afloramiento estudiado en el presente trabajo.

(Modificado de Sopeña y De Vicente, 2004).

La parte septentrional de la zona de enlace se encuentra a caballo sobre las tres unidades principales; Cuenca del Ebro, Cordillera Ibérica y Cordillera Costero Catalana, constituyendo un límite claro. En cambio, el límite en el suroeste se encuentra poco definido y en el sureste se desconoce ya que se encuentra sumergido en el mar.

Guimerà (1988) establece las principales subdivisiones de la zona de enlace (figura 3), que vienen descritas a continuación:

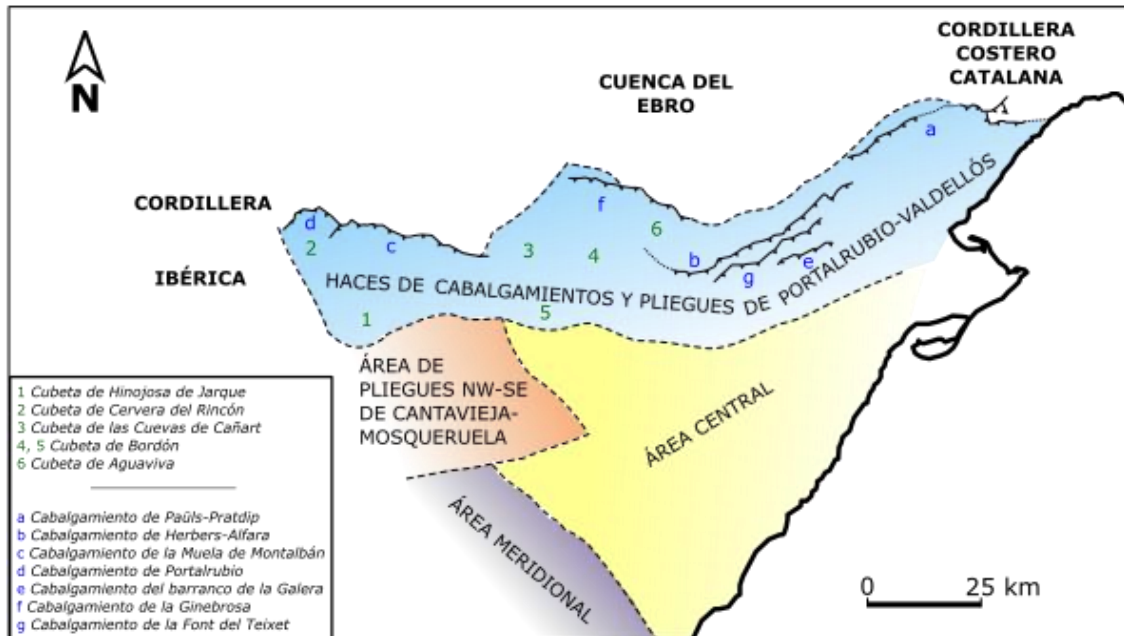


Figura 3. Subdivisiones de la Zona de Enlace con los cabalgamientos principales y las cubetas cenozoicas internas. (Modificado de Guimerà, 1988).

- Los **haces de cabalgamientos y pliegues de Portalrubio-Valdellós** constituyen el límite norte que pone en contacto la zona de enlace con la Cuenca del Ebro. Esta parte consiste en una alineación de pliegues y cabalgamientos de gran longitud que afectan a la cobertera mesozoica. La orientación de estas estructuras es variable, aunque en general la directriz es E-W con vergencia dominante hacia el Norte. Las estructuras llegan a adquirir orientación ibérica en la parte occidental.
- La importancia de la deformación por pliegues y fallas va disminuyendo progresivamente hacia el Sur, dando lugar en último término a una estructura subtabular, que se trataría del **Área Central**, en la que las capas se mantienen horizontales o muy poco inclinadas.
- La denominada **Área Meridional** se encuentra caracterizada por extensos afloramientos triásicos y fallas normales que afectan al mesozoico.

- Por último, en el **Área de pliegues NW-SE de Cantavieja-Mosqueruela** es muy importante el desarrollo de pliegues NW-SE de gran curvatura y de orden kilométrico.

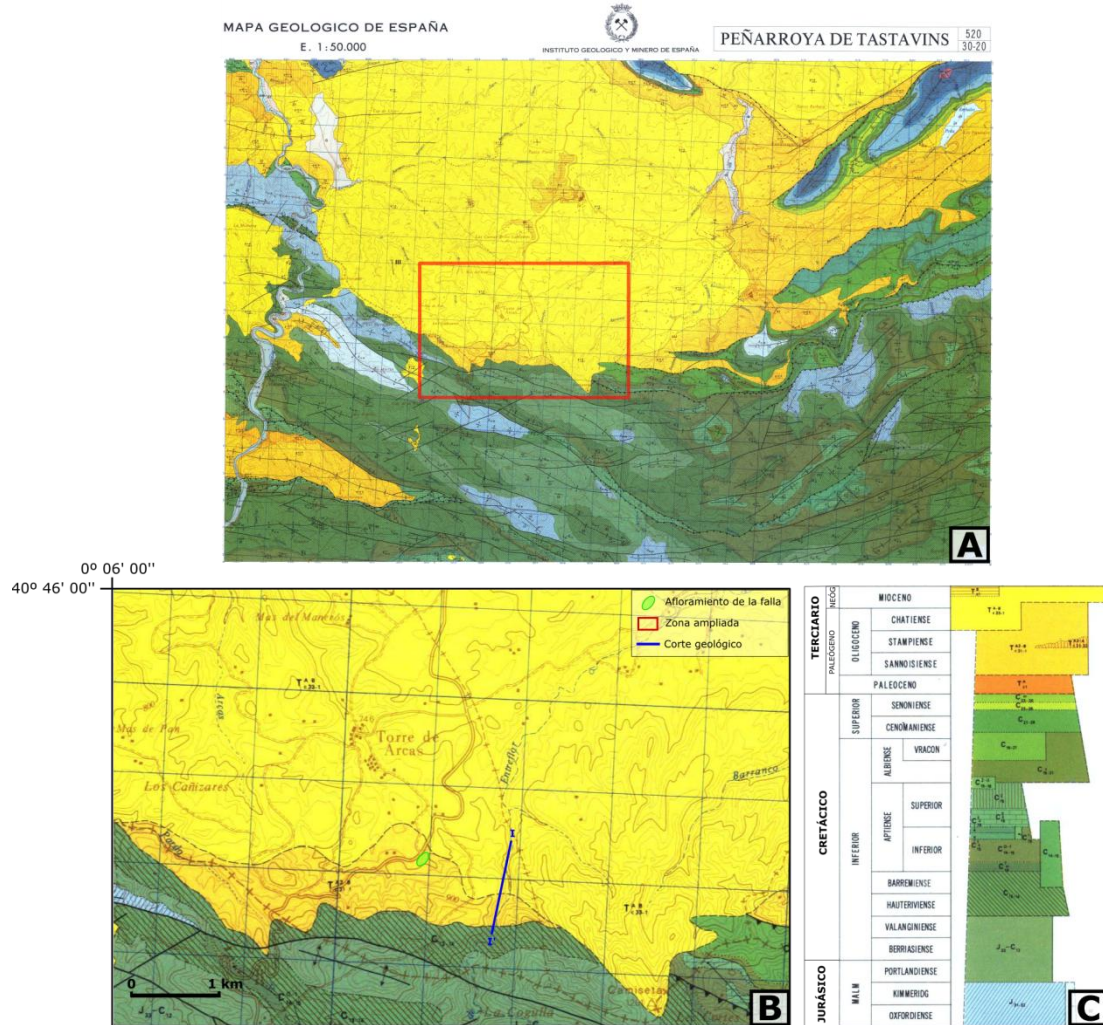
La formación de la Cordillera Ibérica se atribuye a una serie de movimientos tectónicos en los que se pueden diferenciar varias fases de actividad tectónica alternando con períodos de relativa calma. En la orogenia hercínica tuvo lugar la deformación de los materiales paleozoicos, teniendo lugar en última instancia una etapa de fracturación formando fallas kilométricas que influyeron posteriormente la sedimentación mesozoica.

Durante el Mesozoico se producen movimientos verticales que conducen a una subsidencia diferencial originando cuencas intracratónicas o cubetas separadas por umbrales ocasionalmente emergidos, cuyos límites se encontraban condicionados por el basculamiento o hundimiento de bloques a lo largo de fallas. Estas cuencas estaban ocupadas por mares epicontinentales, por lo que durante el Jurásico y Cretácico la sedimentación es principalmente de carbonatos marinos de aguas someras, con aportes de terrígenos en las zonas marginales de estas cuencas.

En el Cretácico terminal se produce, en primer lugar una subsidencia con invasión marina, seguida de la emersión del dominio ibérico. Por último, en el Paleógeno – Neógeno se produce la elevación de la Cordillera Ibérica debido al acercamiento de las placas africana y europea lo que origina la inversión de las cuencas extensionales formadas durante el mesozoico. En primer lugar se forman amplios pliegues en las directrices NW-SE para la Cordillera Ibérica y NE-SW para la Cordillera Costero Catalana, asociados a cabalgamientos con vergencia dominante hacia el norte, favorecidos por despegues a favor de niveles plásticos (Keuper y Muschelkalk). La cobertera (sedimentos mesozoicos) se pliega y se fractura y origina frentes de cabalgamiento cuando las masas se encuentran con obstáculos, como masas de sedimentos Cenozoicos ya depositados (González, 1989).

4.3 Sector de Torre de Arcas

La cartografía del sector estudiado se encuentra dentro de la hoja número 520 “Peñarroya de Tastavins” del Mapa Geológico de España 1:50000 (Figura 4 A).



A continuación se describen los niveles más importantes que afloran en el sector, por orden de más a menos moderno, tal como se puede observar en la columna estratigráfica de la figura 4 C:

- Neógeno: es el que abarca más parte del mapa y además es el más reciente, está compuesto por conglomerados, arcillas y areniscas.
- Paleógeno: abarca una pequeña parte del mapa pero se encuentra dentro del trazo del corte. Está compuesto por margocalizas asalmonadas y calizas dolomitizadas de color gris-rojo.
- Cretácico inferior: se trata de la unidad que se encuentra en contacto con el Cenozoico. Está compuesto por calizas y calizas bioclásticas alternando con margas con escasos bancos de areniscas calcáreas.
- Jurásico superior – Cretácico inferior: son calizas con patina limolítica, brechas intraformacionales, calizas de cantos negros y calizas grises.

5. METODOLOGÍA

5.1 Toma de muestras

En un primer momento se realizó una primera salida de campo de reconocimiento de la zona, durante la cual se tomaron 3 bloques a lo largo del cabalgamiento con el objetivo de tener una primera idea de la fábrica magnética y determinar si el estudio en el cabalgamiento de Monroyo iba a ser concluyente.

Antes de extraer los bloques del afloramiento se tomaron las medidas de dirección buzamiento para su posterior orientación. En el laboratorio se procedió a cortar los bloques en pequeños cubos de 2,1 cm x 2,1 cm con una sierra refrigerada con aceite. Para ello se marcaron previamente en los bloques líneas paralelas y perpendiculares a la dirección del plano orientado de la muestra (intersección del plano con el plano horizontal), de esta manera se puede indicar mediante una flecha la orientación de cada espécimen en lo que sería el afloramiento.

En total se obtuvieron 37 especímenes mediante el corte de los bloques en el laboratorio (figura 6 A):

- Bloque 1 (B1): 10 especímenes
- Bloque 2 (B2): 6 especímenes
- Bloque 3 (B3): 21 especímenes

Se debe tener en cuenta la posibilidad de que algunos de los especímenes obtenidos presenten errores en la orientación debido a la propia manipulación del bloque al extraerlo o bien durante su corte en el laboratorio. Sin embargo, estos posibles especímenes mal orientados son fáciles de identificar una vez que se analiza su fábrica magnética por comparación con los resultados de distintos especímenes pertenecientes al mismo bloque. Además, como consecuencia de las propiedades litológicas del bloque, algunos especímenes se fracturaron en numerosas ocasiones lo que imposibilitó su análisis. A pesar de los problemas descritos anteriormente, este método permitió obtener un gran número de muestras.

La extracción sistemática de muestras orientadas se llevó a cabo mediante una perforadora eléctrica de baterías (figura 5) conectada a una broca de diamante

refrigerada con agua. Esta perforadora obtiene las muestras directamente con el diámetro indicado para analizar la ASM (una pulgada) de modo que después se cortan perpendicularmente al eje del cilindro, pudiéndose en ocasiones obtener varios especímenes de la misma perforación. Cabe destacar que todas las muestras fueron tomadas en el bloque inferior del cabalgamiento principal al tratarse de material con propiedades magnéticas idóneas para el estudio. El bloque superior del cabalgamiento al estar conformado por calizas tiene propiedades diamagnéticas, por lo que desde un primer momento se descartó tomar muestras de éste.



Figura 5. Extracción de muestras en el afloramiento.

La metodología llevada a cabo constaba de, en primera instancia, la determinación de varias estaciones a lo largo del cabalgamiento, en este caso se establecieron 7 estaciones, cada una de ellas localizada en una litología distinta a lo largo de la zona de falla. Dentro de cada estación se tomaron varias muestras en función de la accesibilidad. Antes de extraer cada espécimen se anotaron los datos de dirección e inmersión con la ayuda de un orientador consistente en una brújula con un tubo incorporado el cual se introduce en el sitio perforado. Una vez extraídos los especímenes se procedió al siglado de cada uno de ellos indicando el número de estación al que pertenecían y el número de espécimen.

El número de especímenes que fueron extraídos mediante este método fue variable para cada estación, además algunos de ellos no se pudieron analizar al romperse durante su transporte o manipulación en el laboratorio. A continuación se muestra el número de especímenes obtenido en cada estación, que en total son 63 especímenes extraídos directamente en campo (figura 6 B):

- Estación MR0: 1 espécimen
- Estación MR1: 10 especímenes
- Estación MR2: 10 especímenes
- Estación MR3: 12 especímenes
- Estación MR4: 9 especímenes
- Estación MR5: 14 especímenes
- Estación MR6: 7 especímenes



Figura 6. A: Especímenes obtenidos mediante el corte de bloques del afloramiento en el laboratorio (B1, B2 y B3). B: Especímenes obtenidos mediante la perforación directa en campo (MR0, MR1, MR2, MR3, MR4, MR5 y MR6).

Estos últimos especímenes, los que fueron extraídos directamente en campo, son los que se van a tener en cuenta a la hora de representar la ASM a lo largo del cabalgamiento y para su interpretación estructural, ya que su extracción fue realizada en detalle a lo largo de todo el cabalgamiento. No obstante, esta propiedad también se ha analizado para los bloques cortados en el laboratorio a modo de comparación de resultados, aunque no se han utilizado finalmente para obtener conclusiones estructurales debido a que se desconoce su ubicación exacta en el afloramiento.

5.2 Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética

Una vez obtenidos todos los especímenes se procedió al análisis de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética (ASM) en el laboratorio. Para ello se utilizó el susceptómetro KappaBridge KLY-3S de AGICO del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Zaragoza.

El susceptómetro mide la anisotropía de la susceptibilidad magnética a temperatura ambiente en tres posiciones distintas para cada espécimen y, por último, realiza una medición de la magnitud de la susceptibilidad magnética de éste. Se deben introducir los datos de dirección e inmersión tomados en campo de cada espécimen.

Los resultados obtenidos fueron procesados mediante el programa Anisoft 4.2 (Chadima y Jelinek, 2009), el cual representa las orientaciones y magnitudes de los ejes K1, K2 y K3 del elipsoide. En rocas deformadas los ejes principales del elipsoide de la susceptibilidad coinciden con las direcciones principales del elipsoide de deformación (Hrouda et al., 1976). Además, con la relación entre los ejes resultantes, el mismo programa calcula el grado de anisotropía (P^l), que nos indica la intensidad de la orientación preferencial del mineral, y el parámetro de forma (T), que nos indica la forma del elipsoide de prolato (-1) a oblato (+1).

5.3 Curvas termomagnéticas

Se realizaron curvas termomagnéticas (k-T) con el objetivo de identificar la mineralogía portadora de la fábrica magnética. Las curvas fueron realizadas con el mismo susceptómetro utilizado anteriormente, en combinación un horno CS3 bajo una atmósfera de argón para reducir la oxidación de los minerales.

En total se realizaron 10 curvas termomagnéticas, una para cada estación (7 estaciones) y para cada bloque (3 bloques). Para ello se molieron con ayuda de un mortero de ágata pequeñas muestras de los especímenes a analizar hasta conseguir un polvo homogéneo. En el horno se van a introducir tan sólo 0,5 g de cada muestra.

Las curvas termomagnéticas miden la variación de la susceptibilidad magnética con la temperatura. El susceptómetro toma una medida de susceptibilidad cada cierto tiempo a medida que la temperatura de la muestra va subiendo de 45°C hasta 700°C (curva de ida) y, una vez que se alcanzan los 700°C, vuela a bajar hasta 45°C (curva de vuelta).

Los resultados obtenidos han sido procesados mediante el programa Cureval 8 (Chadima y Hrouda, 2006) en el cual, en primer lugar, se debe corregir la curva mediante la última curva realizada en vacío. El programa representa la curva de la susceptibilidad magnética en función de la temperatura, de ida y de vuelta, y además calcula de manera aproximada la relación entre minerales paramagnéticos y

ferromagnéticos. Esta relación la calcula mediante la pendiente de la curva de ida obtenida, en general, las muestras con una alta proporción de minerales paramagnéticos presentan una hipérbola decreciente, sin embargo, aquellas que tienen mayor proporción de ferromagnéticos, presentan una pendiente positiva muy pronunciada (Hrouda et al., 1997). Aunque se debe tener en cuenta que la pendiente se ve afectada por las altas susceptibilidades magnéticas de los minerales neoformados durante el proceso del calentamiento. Por ello, para que la relación entre los minerales paramagnéticos y ferromagnéticos sea fiable, debemos seleccionar que calcule la pendiente entre los 45°C y los 375°C como máximo.

5.4 Láminas delgadas

Se tomaron varios especímenes de cada estación para hacer láminas delgadas con distintas orientaciones con el objetivo de observar en el microscopio las estructuras que se puedan relacionar con los resultados de la ASM. Las láminas fueron preparadas por el Servicio de Preparación de Rocas y Materiales Duros de la Universidad de Zaragoza.

Se prepararon un total de 11 láminas delgadas de varios especímenes extraídos en campo, se tomaron dos de cada estación exceptuando la estación MR4 en la que solo se tomó una y la estación MR0 en la que, debido al estado del único espécimen disponible, no se pudo hacer lámina. Los cortes se realizaron en función de las estructuras que se querían observar en el laboratorio: foliación (identificada previamente en la ASM) y grietas (observables a simple vista en los especímenes). La orientación que se escogió para cada lámina se encuentra a continuación:

- MR1-2: perpendicular a la foliación y a la lineación (000°, 90°)
- MR1-4: perpendicular a las grietas observadas
- MR2-4: perpendicular a la foliación y a la lineación (000°, 90°)
- MR2-5: perpendicular a la foliación y paralelo a la lineación (045°, 40°)
- MR3-7: perpendicular a la foliación y a la lineación (000°, 90°)
- MR3-4: perpendicular a la foliación y paralelo a la lineación (000°, 90°)
- MR4-2: perpendicular a la foliación y paralelo a la lineación (000°, 90°)
- MR5-8: perpendicular a la foliación y a la lineación (000°, 90°)
- MR5-7: perpendicular a la foliación y paralelo a la lineación (000°, 90°)
- MR6-9: perpendicular a la foliación y a la lineación (000°, 90°)

- MR6-7: perpendicular a la foliación y paralelo a la lineación (045°, 24°S)

5.5 Difracción de Rayos X

La difracción de rayos X (DRX) se realizó con el fin de determinar los minerales presentes, para así complementar la información de la mineralogía magnética obtenida a partir de las curvas termomagnéticas. Este análisis fue realizado para cada una de las estaciones y para cada uno de los bloques, por lo que se analizaron 11 muestras en total (Figura 7).



Figura 7. A: Tamiz y mortero utilizados para la preparación de las muestras. B: Muestras resultantes. C: Difractómetro utilizado para el análisis. D: Obtención de difractogramas.

En primer lugar se volvieron a moler las muestras que se habían preparado anteriormente para las curvas termomagnéticas, el polvo resultante se hizo pasar cuidadosamente por un tamiz con una luz de 53 μm con la ayuda de un pincel. Durante la preparación de las muestras es muy importante tener cuidado para no contaminarlas entre ellas, por ello se lava todo el material después de moler cada muestra. Se necesita una pequeña cantidad de cada muestra pero ésta debe ser representativa del total. Una vez tamizadas, se prepararon las muestras de manera desorientada.

Las muestras se han rodado mediante el difractómetro de polvo Phillips PW1729, con 40 kV de voltaje, 30 mA de intensidad y radiación $K\alpha$ del Cu. Se utilizó un monocromador de grafito y una rendija automática. Los difractogramas fueron

obtenidos del intervalo 3° - 70° 2θ , con una tasa de goniómetro de 0.1° $2\theta/s$ y tiempo de integración 0,4s. Para el registro se utilizó el Software X Powder (Martín Ramos, 2007).

Este método se trata de un análisis semicuantitativo de los minerales presentes en la muestra, algunos grupos de minerales no se pudieron diferenciar y para hacerlo se debería hacer un análisis de agregado orientado. Algunos minerales pudieron ser detectados en cantidades tan bajas que no ha sido posible calcular un porcentaje, aunque no por ello se deben despreciar en cuanto a su importancia en la fábrica magnética.

5.6 Análisis estructural

En este trabajo, la parte de análisis estructural se puede dividir en dos bloques: por una parte se procedió a cartografiar las proximidades del afloramiento del cabalgamiento de Monroyo, pero dado que la mayor parte de la zona circundante al cabalgamiento se encuentra cubierta (exceptuando algún pequeño afloramiento, como es el caso del afloramiento del cabalgamiento), la cartografía de la zona se realizó en el barranco de Entreflor en el cual, gracias a la erosión natural del arroyo con el mismo nombre, se pueden observar las unidades subyacentes y sus estructuras. Para ello se procedió en primera instancia en la revisión bibliográfica de trabajos que abordan la geología de esta zona. Posteriormente se realizaron varias salidas de campo para observar y medir la orientación de las capas y de las estructuras. Estos datos fueron representados mediante proyecciones estereográficas con el programa Stereonet. A partir de esta información se realizó un corte geológico subperpendicular a la dirección de la estructura principal.

Por otra parte se realizó una cartografía en detalle del afloramiento del cabalgamiento de Monroyo obteniendo un perfil del afloramiento. En el afloramiento se distinguieron, además de la estructura principal (el cabalgamiento estudiado), varias litologías y fracturas y fallas secundarias. De este afloramiento se tomaron también medidas para realizar proyecciones estereográficas.

6. RESULTADOS

6.1 Análisis estructural

6.1.1 Barranco de Entreflor

El barranco de Entreflor se sitúa a aproximadamente 1 km al Este del afloramiento del cabalgamiento estudiado, se trata de un barranco angosto de paredes casi verticales en algunos tramos que permanece seco la mayor parte del año. El corte realizado traza un perfil NNE-SSW coincidiendo con el trazado del arroyo. La parte aguas arriba (hacia el Sur) donde se empezó a cartografiar se encuentra a 820 m.s.n.m. mientras que, aguas abajo, en el límite septentrional del perfil, se encuentra a 760 m.s.n.m. En total este perfil tiene 1 km de longitud aproximadamente. El objetivo, además de profundizar en el conocimiento de la geología regional de la zona para comprender mejor la cinemática del cabalgamiento estudiado, es relacionar las orientaciones de las estructuras presentes en el cabalgamiento de Monroyo con otras estructuras.

Se tomaron varias medidas de planos de estratificación, planos de cabalgamiento, planos axiales de pliegues, foliaciones y estrías, a lo largo del barranco, estas medidas han sido representadas en proyección estereográfica y se encuentran a continuación, en las figuras 8, 9, 10 y 11, junto con las fotografías de los afloramientos.

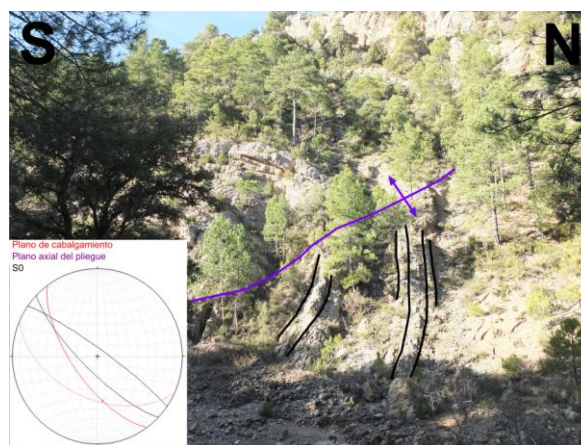


Figura 8. Fotografía y proyección estereográfica de los planos de estratificación en un anticlinal localizado en materiales cretácicos al sur de la zona cartografiada. Se ha representado solamente la estratificación del flanco norte, ya que el flanco sur es subhorizontal.

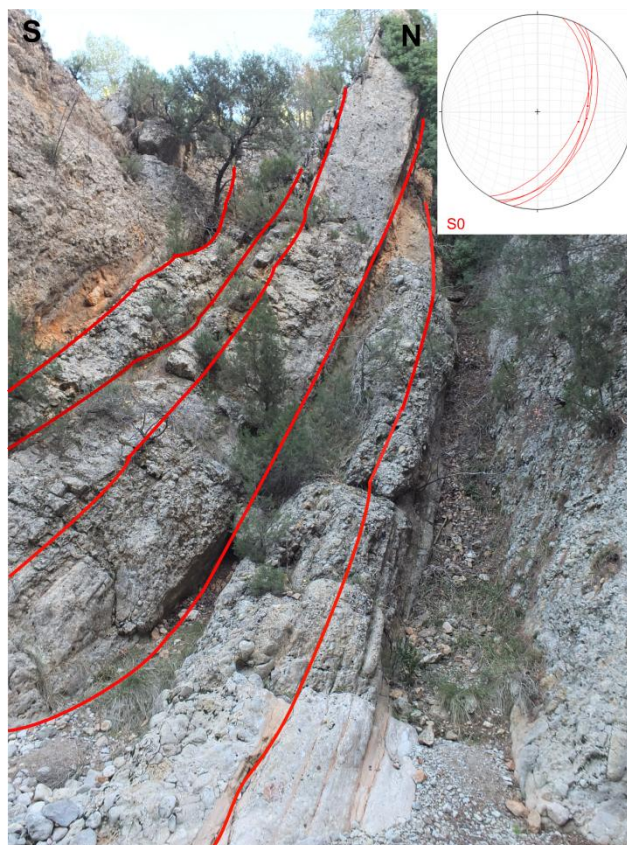


Figura 9. Fotografía y proyección estereográfica de los planos de estratificación de una cuña cenozoica que se encuentra entre dos planos de cabalgamiento.

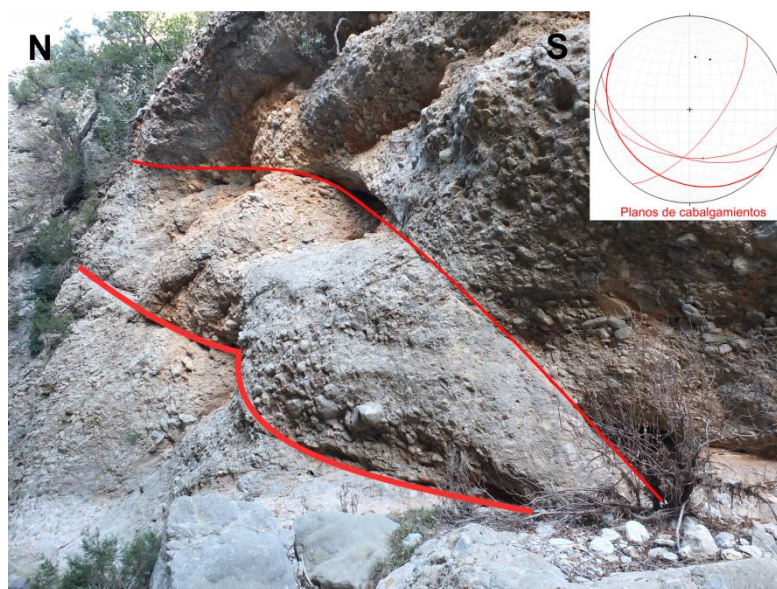


Figura 10. Fotografía y proyección estereográfica de planos de cabalgamiento con desplazamiento métrico ubicados en los depósitos del Cenozoico.

Además, puede observarse una foliación de presión disolución bien desarrollada, que afecta a los conglomerados de cantos calcáreos. Esta foliación, cuya orientación es difícil de medir, presenta dirección general E-W y buzamiento vertical.

Con la información tomada en campo se ha realizado un corte geológico, representado en la figura 11. Se encuentran varios cabalgamientos enraizados probablemente en el Keuper que afectan a la cobertera mesozoica, la cual se encuentra fuertemente plegada con pliegues vergencia hacia el Norte. El Cenozoico se encuentra por encima del Mesozoico de manera discordante. En el barranco estudiado, el Mesozoico aflorante es del Cretácico Inferior, mientras no se han distinguido distintos niveles dentro de las rocas cenozoicas ya que la litología es muy parecida y no se ha identificado ninguna discordancia en campo.

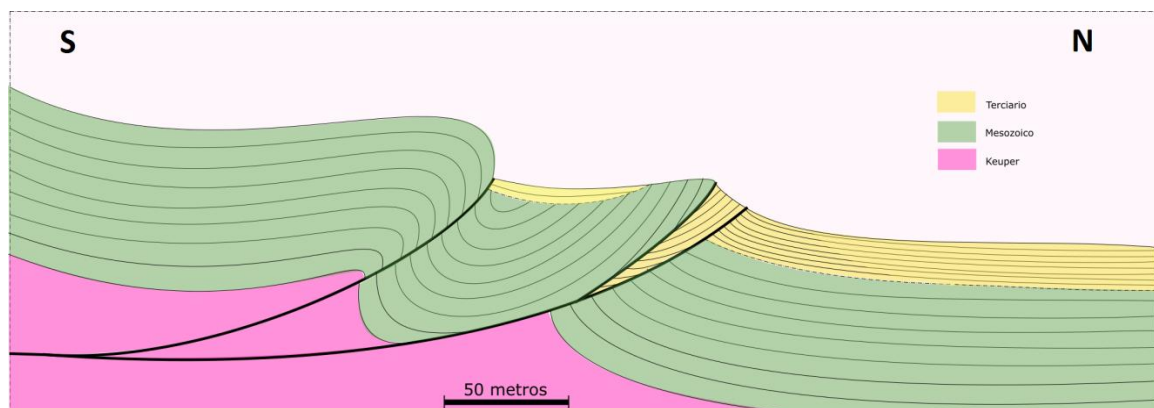


Figura 11. Corte geológico realizado en el barranco de Entreflor.

6.1.2 Afloramiento del cabalgamiento de Monroyo

En el afloramiento del cabalgamiento de Monroyo se realizó, por una parte, la diferenciación de distintas bandas litológicas en el bloque inferior en función del color, ya que todo el bloque está representado por materiales margosos-arcillosos. Esta diferenciación se utilizó para escoger la localización de las estaciones a lo largo del afloramiento (Figura 12).

Por otra parte, se distinguieron distintos planos que fueron medidos y representados con el programa Stereonet. Se ha decidido representar los resultados en tres proyecciones estereográficas en función de las distintas orientaciones de los planos a lo largo del afloramiento, estas zonas comprenden, en orden de Norte a Sur: bloque

inferior menos deformado, bloque inferior muy deformado y bloque superior. Se diferencian cinco planos principales, que se describen a continuación. Estos planos se encuentran indicados en el afloramiento con distintos colores y en las proyecciones estereográficas siguiendo el mismo estilo, también en la figura 12. Las estructuras medidas son las siguientes:

- Superficies de estratificación (S0), las cuales sólo se pueden distinguir en el bloque superior del cabalgamiento y en la zona más alejada al plano del cabalgamiento dentro del bloque inferior. Esto se debe a que la zona del bloque inferior más cercano al plano del cabalgamiento se encuentra muy deformada y no se puede distinguir ningún plano de estratificación. Los planos de estratificación considerados presentan distintas orientaciones en el bloque superior (de edad mesozoica) respecto a los del bloque inferior (de edad cenozoica). En el bloque superior el plano de estratificación es aproximadamente N-S con buzamientos sobre los 30°, mientras que en la parte donde se distingue la estratificación del bloque inferior el plano tiene una dirección WNW-ESE con buzamientos que llegan a ser subverticales.
- Fracturas (1): estos planos indican fracturas conjugadas al plano del cabalgamiento principal. Se tratan de fracturas por cizalla formadas en relación con el cabalgamiento principal y presentan buzamientos contrarios a éste (fracturas conjugadas).
- Fracturas (2): en el afloramiento se distinguen varias fracturas con la misma orientación, sin embargo, sólo se ha podido medir una en la parte más alejada al plano del cabalgamiento dentro del bloque inferior. Estas fracturas no presentan relación con la dirección de la estructura general ni con la estratificación. Se tratan de fracturas secundarias probablemente posteriores al cabalgamiento principal.
- Fracturas (3): representan fracturas perpendiculares al plano de estratificación que se encuentran únicamente en el bloque superior del cabalgamiento.

- Fracturas (4): se trata de fracturas o pequeños cabalgamientos con la misma dirección y buzamiento que el plano de falla principal (fracturas sintéticas).
- Cabalgamiento principal: se ha querido destacar el plano del cabalgamiento objeto de estudio, que afloraba de forma espectacular y que presenta una dirección y buzamiento de 080, 55 S.

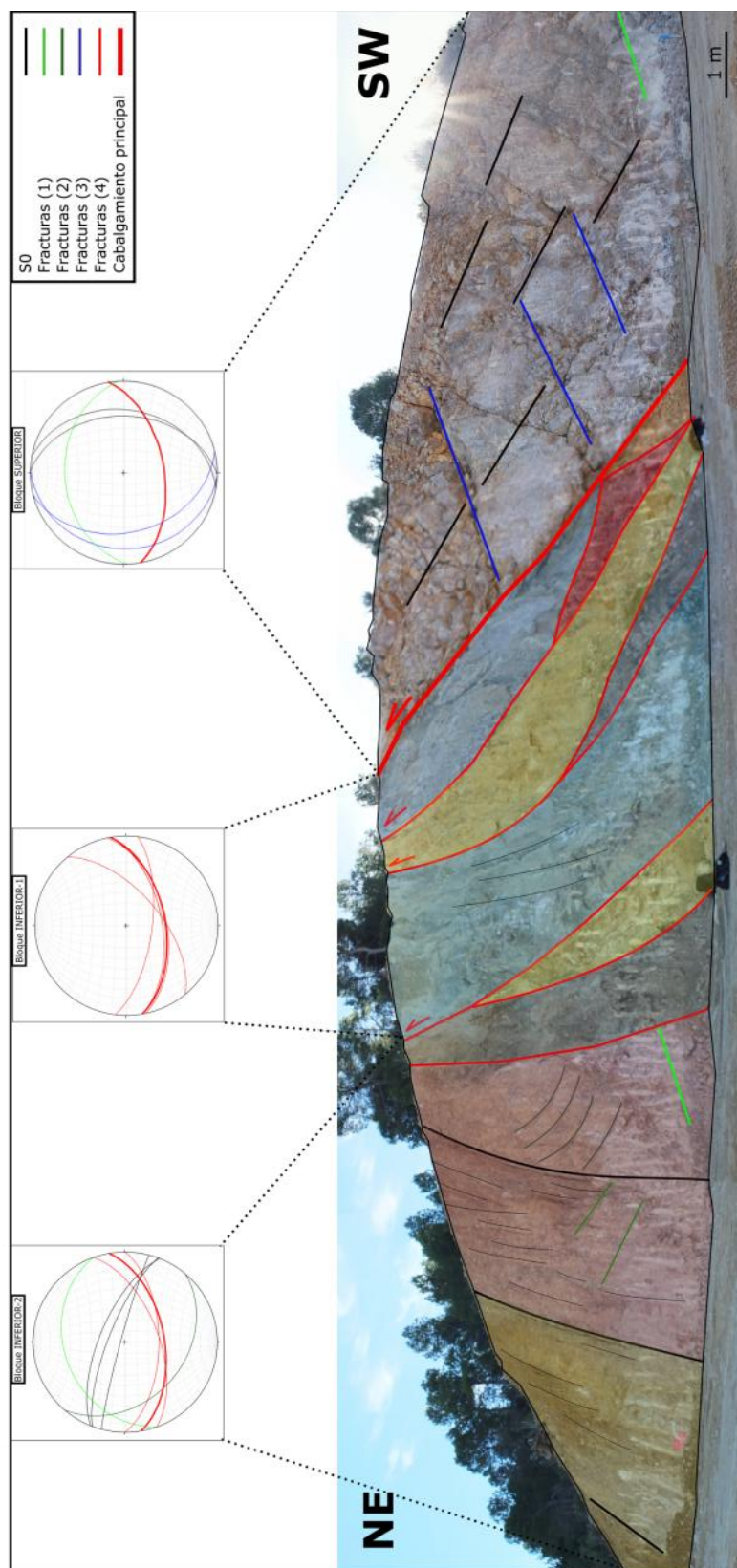


Figura 12. Panorámica del afloramiento del cabalgamiento de Monroyo con los planos indicados y representados en estereogramas.

6.2 Anisotropía de la susceptibilidad magnética

En este apartado se exponen los resultados obtenidos del análisis de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética en todas las muestras. Se ha representado en el mismo elipsoide de ASM los datos obtenidos en todas las estaciones (MR0, MR1, MR2, MR3, MR4, MR5 y MR6), en la figura 13, así como la gráfica T/P, en la figura 14. Debido a que se desconoce la ubicación exacta de los bloques extraídos en el afloramiento, estos no se han tenido en cuenta para la representación de la ASM global en la zona de falla ni para representar la gradación de la fábrica magnética a lo largo de esta.

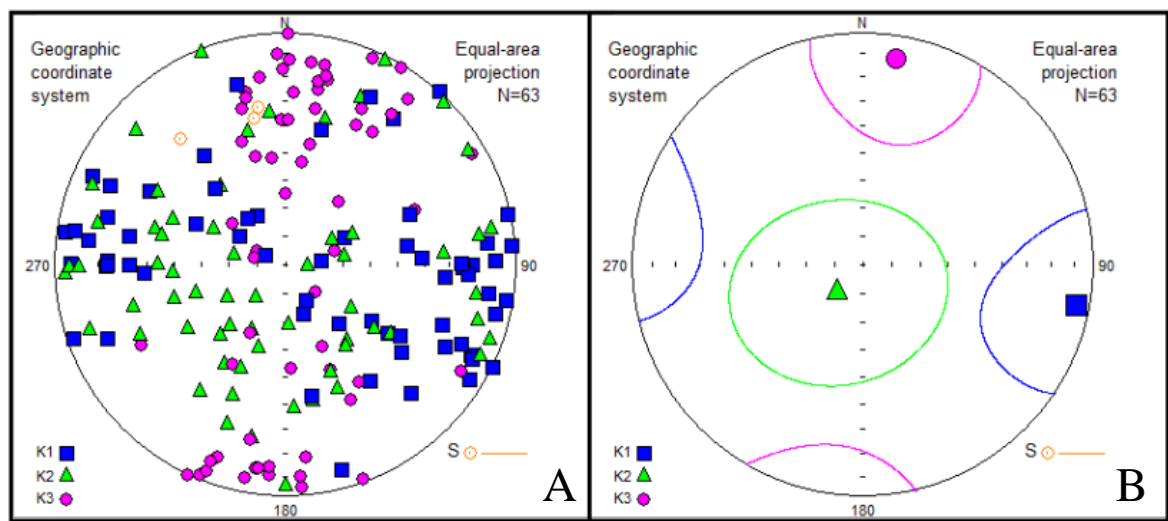


Figura 13. A: Representación conjunta de todos los resultados obtenidos de la ASM en las estaciones MR0, MR1, MR2, MR3, MR4, MR5 y MR6. B: Representación de las medias de los resultados anteriores con las elipses de confianza.

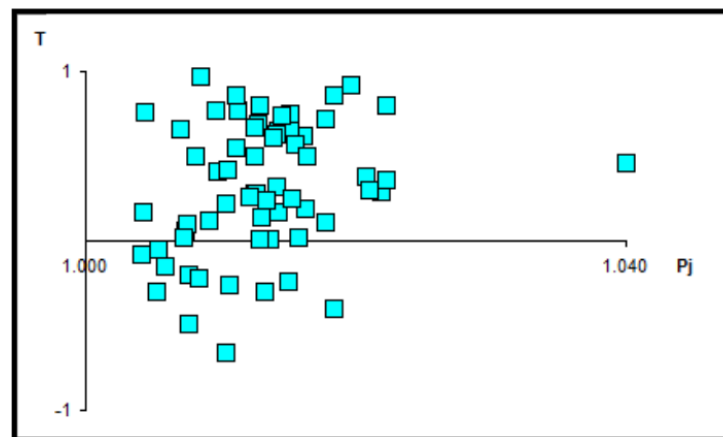


Figura 14. Diagrama P/T de las muestras representadas en la anterior figura.

A continuación se muestran las tablas de los datos magnéticos direccionales y escalares para cada una de las estaciones y de los bloques (tablas 1 y 2).

Tabla 1. Tabla resumen de los datos magnéticos direccionales.

Estación	$k_{\text{máx}}$ dec/inc	Ángulo de confianza	k_{int} dec/inc	Ángulo de confianza	$k_{\text{mín}}$ dec/inc	Ángulo de confianza
MR0	123.9/46.1	-	254.5/32	-	2.7/26.5	-
MR1	269.5/25.6	15.7/9.6	157.5/38	78.8/10.5	24.3/41.2	78.8/14.5
MR2	99.6/14.7	28.2/16.1	211.8/55.2	28.9/12.6	0.6/30.7	18/16.7
MR3	94.4/15.3	24.7/13	280.6/74.6	26.9/21.1	184.8/1.6	24.2/12.8
MR4	86.3/17.4	45.9/18.5	309.3/66.8	49/17.1	181/14.9	33.2/20.1
MR5	289.4/3.9	60.5/13.8	175.3/80.5	60.5/14.9	20/8.7	16.5/11.8
MR6	127.4/23.9	25.2/12	239.3/40.1	41.8/24.2	15.2/40.4	41.6/11.4
B1	278.6/41.1	22.3/15.5	138/41.6	61.5/20.1	28.1/21	61.4/16.9
B2	215.1/46.6	68.1/32.7	25.3/42.9	68.1/56.1	119.9/4.9	56.4/32.2
B3	213.8/0.2	11.9/5.7	305.6/82.5	46.2/11.7	123.8/7.5	46.2/5.5

Tabla 2. Tabla resumen de los datos magnéticos escalares.

Estación	N	Km ($\times 10^{-6}$ SI)	Desviación Std ($\times 10^{-6}$ SI)	P	Desviación Std	T	Desviación Std
MR0	1	86.2	-	1.021	-	0.293	-
MR1	10	98.6	28.9	1.009	0.006	0.167	0.383
MR2	10	108	20.7	1.012	0.003	0.35	0.489
MR3	12	90.7	21.5	1.012	0.004	0.221	0.425
MR4	9	93.5	18.2	1.016	0.01	0.46	0.391
MR5	14	170	73.2	1.013	0.004	0.355	0.285
MR6	7	94.9	7.32	1.013	0.003	0.363	0.423
B1	10	148	27.9	1.05	0.028	-0.045	0.39
B2	6	180	31.1	1.086	0.02	0.233	0.353
B3	21	97.8	12.5	1.046	0.02	-0.091	0.4

En las figuras 15 y 16 se encuentran los resultados obtenidos de la ASM para cada una de las muestras, tanto el elipsoide de la ASM como el gráfico T/P. Para facilitar la posterior interpretación de los resultados, se ha construido un esquema que localiza las estaciones dentro de la zona de falla (figura 17).

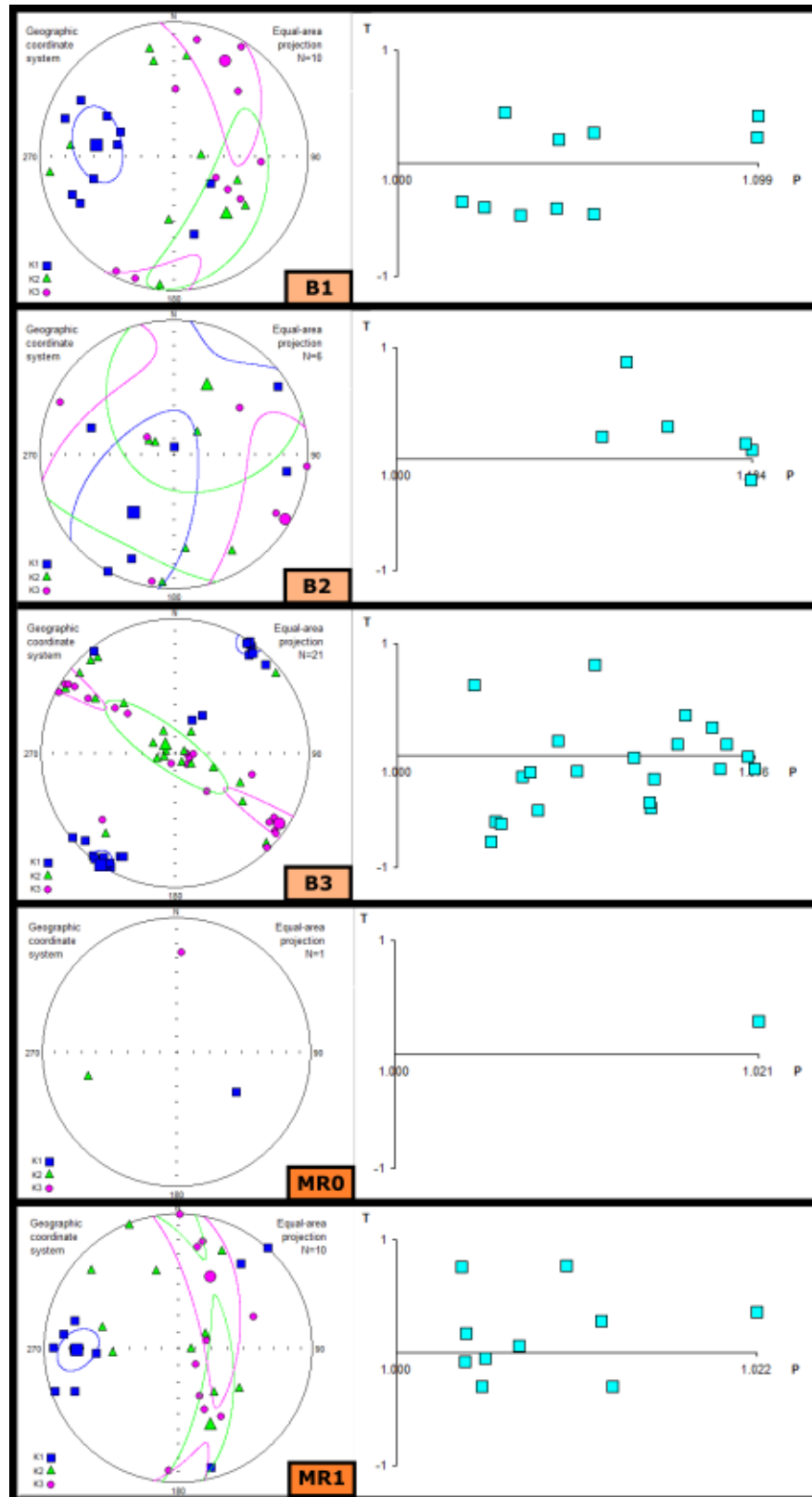


Figura 15. Resultados ASM para los especímenes de los bloques B1, B2 y B3 y la estación MR1 con el correspondiente gráfico P/T a la derecha.

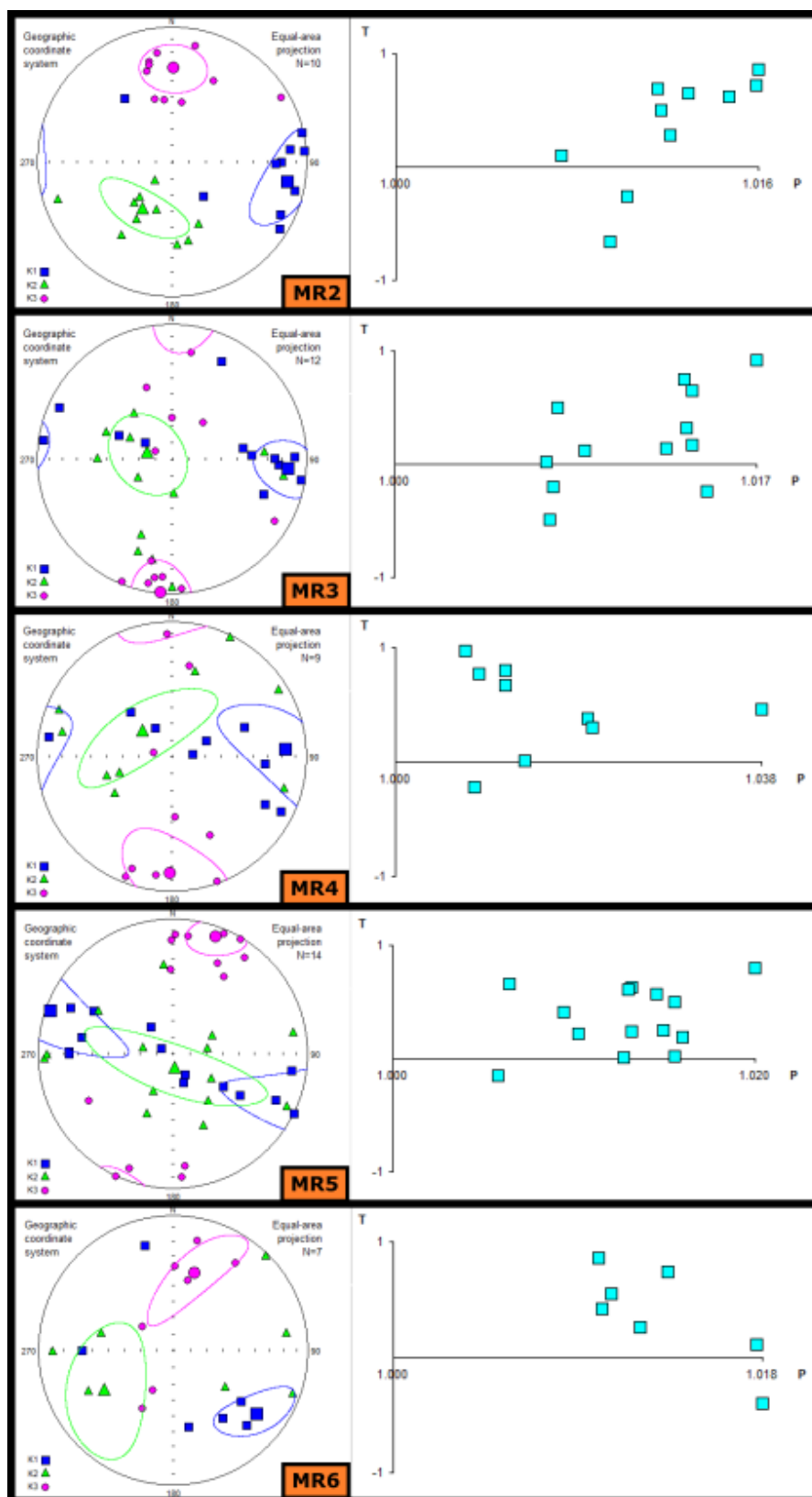


Figura 16. Resultados ASM para los especímenes de las estaciones MR2, MR3, MR4, MR5 y MR6 con el correspondiente gráfico P/T a la derecha.

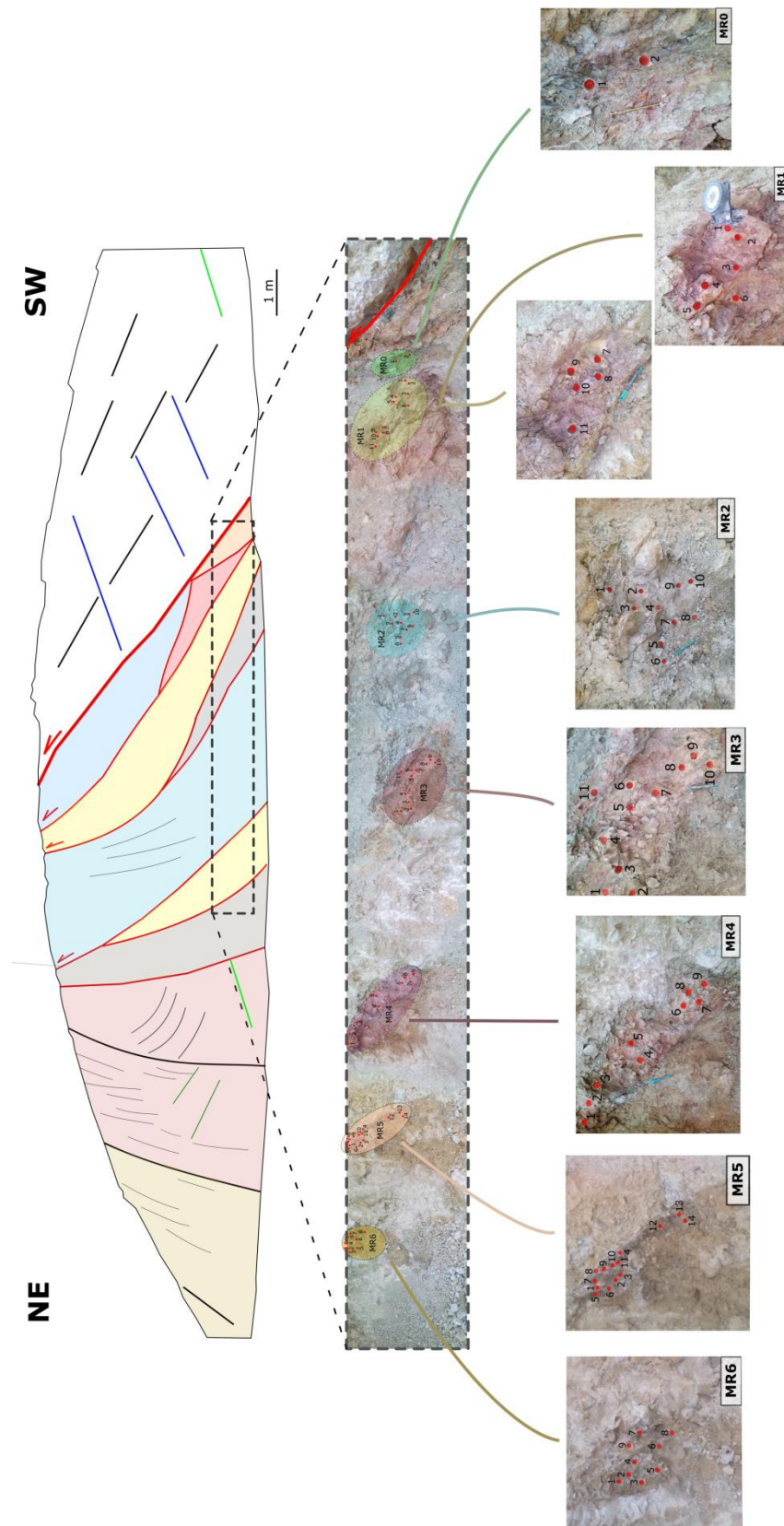


Figura 17. Esquema del panorama del afloramiento del cabalgamiento de Monroyo con la ubicación de las estaciones.

6.3 Mineralogía portadora de la fábrica magnética

La obtención de la mineralogía magnética presente en las muestras se ha basado en tres métodos que han sido desarrollados a continuación en subapartados distintos.

6.3.1 Curvas termomagnéticas

Por otra parte, se encuentran los resultados obtenidos mediante la realización de curvas termomagnéticas, los cuales nos dan la relación entre las fases ferromagnética y paramagnética. Esta relación se encuentra expuesta en la siguiente tabla (tabla 3), mientras que las curvas obtenidas se encuentran en las figuras 18 y 19.

Durante la realización de este método, nos dimos cuenta de un aspecto interesante relacionado con la metodología utilizada al cortar los especímenes. Los bloques (B1, B2 y B3), que habían sido extraídos del afloramiento y cortados posteriormente en el laboratorio mediante una sierra que refrigera con aceite, presentaban mayor porcentaje de minerales ferromagnéticos respecto a los especímenes que habían sido extraídos directamente en el afloramiento mediante una perforadora que refrigera con agua. Esto nos llevó a la conclusión de que el aceite había disuelto una parte de los filosilicatos (minerales paramagnéticos) presentes en la muestra, lo que hacía que el porcentaje de minerales ferromagnéticos fuera mayor en los especímenes que habían entrado en contacto con el aceite. Por esta razón, los resultados de la mineralogía de los bloques (B1, B2 y B3) no se han tenido en cuenta.

Debido al problema explicado en el párrafo anterior, se realizó una prueba de analizar hasta qué punto el contacto con aceite había afectado a la mineralogía de las muestras. Se sumergió un espécimen que había sido cortado con agua, por lo que su mineralogía no había sido modificada al cortarla, y después de haberse secado completamente se analizó su mineralogía mediante la realización de una curva termomagnética y un difractograma, que se encuentra en el siguiente subapartado. El espécimen tomado fue uno de la estación MR5 y el modificado ha sido nombrado como MR5(1) y la curva termomagnética de este último se encuentra en la figura x. Sin embargo, los resultados de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética no deberían variar por este motivo, por lo que no se ha realizado otro análisis de la ASM para la muestra MR5(1).

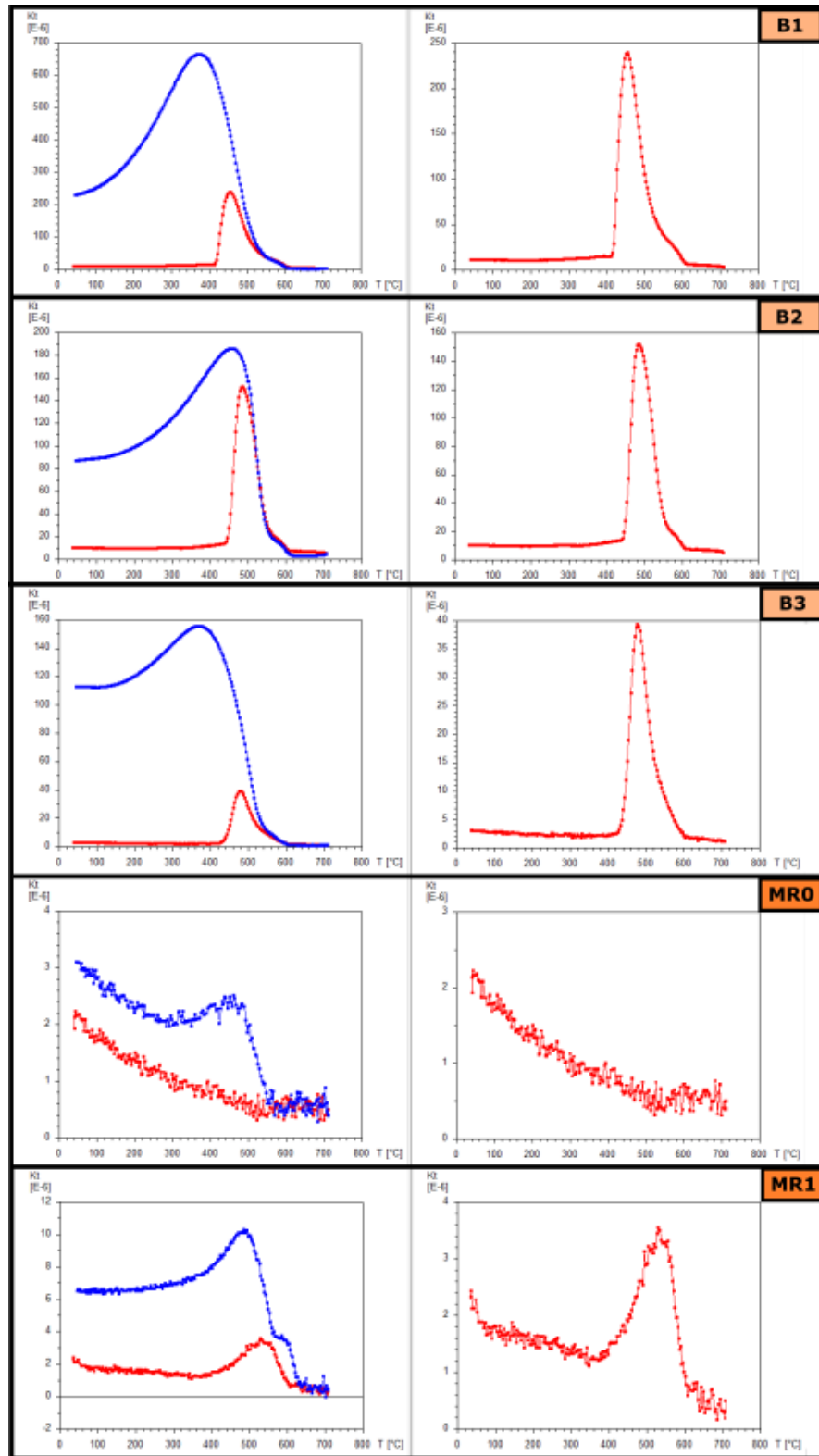


Figura 18. Curvas termomagnéticas para cada una de las muestras B1, B2, B3, MR0 y MR1. A la izquierda curvas de ida y vuelta y a la derecha curvas de ida únicamente.

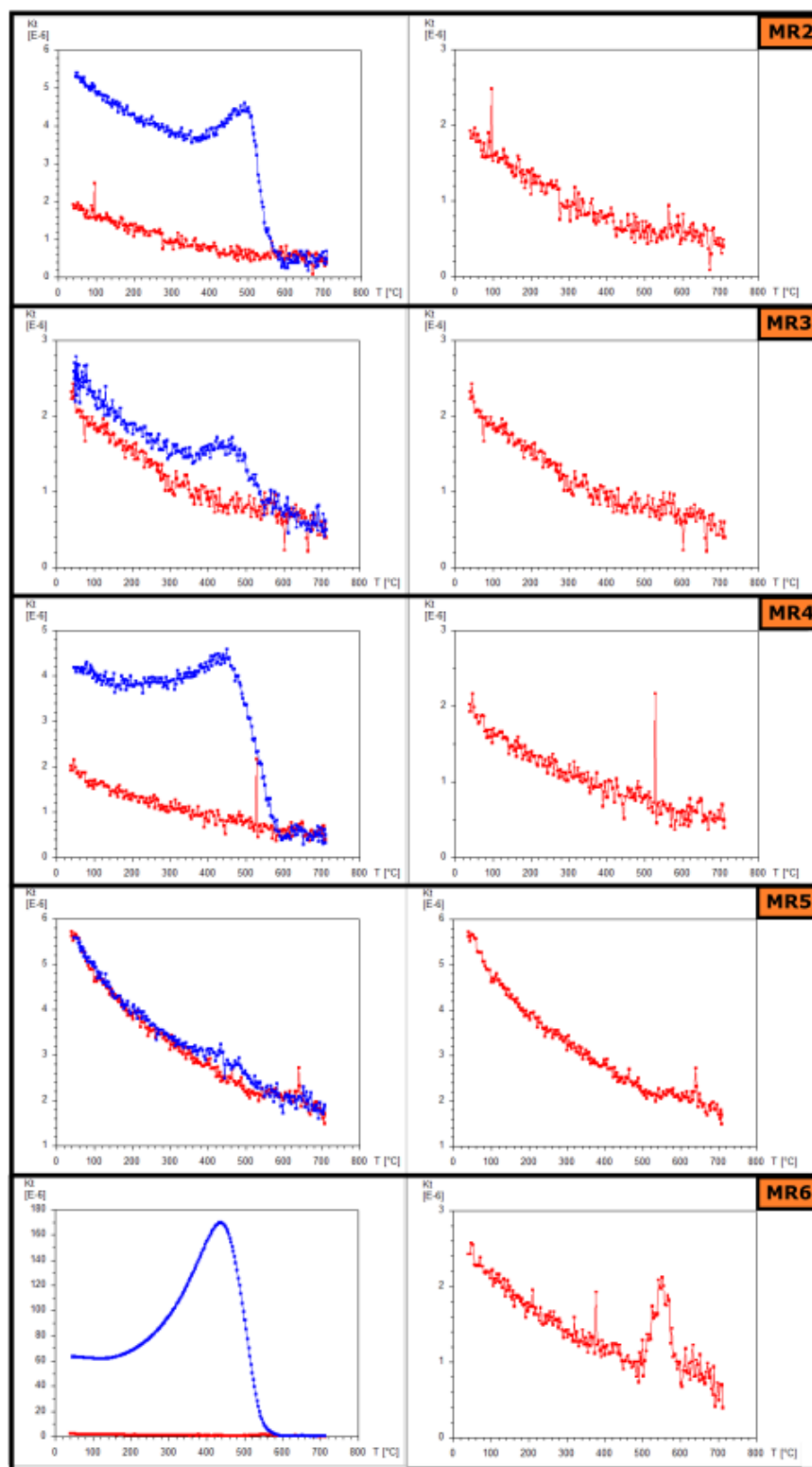


Figura 19. Curvas termomagnéticas para cada una de las muestras MR2, MR3, MR4, MR5 y MR6. A la izquierda curvas de ida y vuelta y a la derecha curvas de ida únicamente.

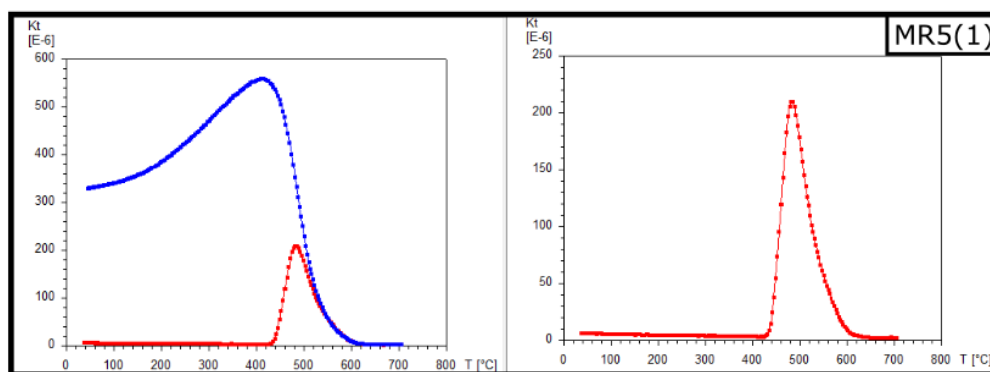


Figura 20. Curva termomagnética para la muestra MR5(1). A la izquierda la curva de ida y de vuelta y a la derecha la curva de ida únicamente.

Tabla 3. Tabla de los resultados obtenidos mediante las curvas termomagnéticas para cada una de las muestras. Los porcentajes han sido calculados entre 45°C y 375°C.

Estación	Ferromagnéticos (%)	Paramagnéticos (%)
MR0	0	100
MR1	30	70
MR2	0	100
MR3	0	100
MR4	5	95
MR5	5	95
MR5 (1)	20	80
MR6	2	98
B1	100	0
B2	100	0
B3	35	75

En las figuras se han representado tanto las curvas de ida con las de vuelta, como sólo las de ida. Esto se debe a que, en ocasiones, al representar las curvas de ida y de vuelta juntas, si las curvas de vuelta son muy pronunciadas debido a la neoformación de minerales durante el calentamiento, camufla la pendiente de la curva de ida, que es en realidad, aquella de la que se extrae la información de la mineralogía. Esto ocurre, por ejemplo, en la curva termomagnética de la muestra MR6 y, en menor grado, en las muestras B1 y B3.

6.3.2 Difracción de rayos X (DRX)

A continuación, en la tabla 4, se muestran los resultados de los minerales detectados en los difractogramas. Algunos de los minerales se encuentran en tan baja proporción que no ha sido posible calcular un porcentaje, pero sí que se puede afirmar que han sido detectados. A la derecha de la tabla se ha realizado el cálculo del porcentaje total de minerales paramagnéticos, que resulta de la suma de las micas (Mc) y la clorita (Chl).

Tabla 4. Tabla de los resultados obtenidos mediante Difracción de Rayos X (DRX). Q: cuarzo, Calc: calcita, Mc: micas, Chl: clorita, Gt: Goethita.

	SEMICUANTITATIVO				DETECTADOS		
Muestra	Q (%)	Calc (%)	Mc (%)	Chl (%)	Filosilicatos indeterminados	Gt	% Paramag.
MR0	40	21	22	17			39
MR1	23	54	19	4			23
MR2	28	49	23	0			23
MR3	23	58	19	0			19
MR4	21	66	13	0			13
MR5	18	18	45	18		X	64
MR5 (I)	37	0	63	0		X	63
MR6	9	91	0	0	X		0
B1	25	42	20	13			33
B2	32	31	24	13			37
B3	10	90	0	0	X		0

6.3.3 Láminas delgadas

Las láminas delgadas fueron realizadas con el objetivo de observar la mineralogía y, también, posibles orientaciones de granos minerales asociados a la ASM, como filosilicatos u óxidos de hierro.

A continuación se encuentran algunas imágenes de las láminas delgadas observadas con la lupa, con las lineaciones que han sido identificadas (figuras 21 y 22). En ellas

pueden observarse alineaciones de óxidos de hierro y ordenación interna de los componentes (filosilicatos, microfósiles, etc...).

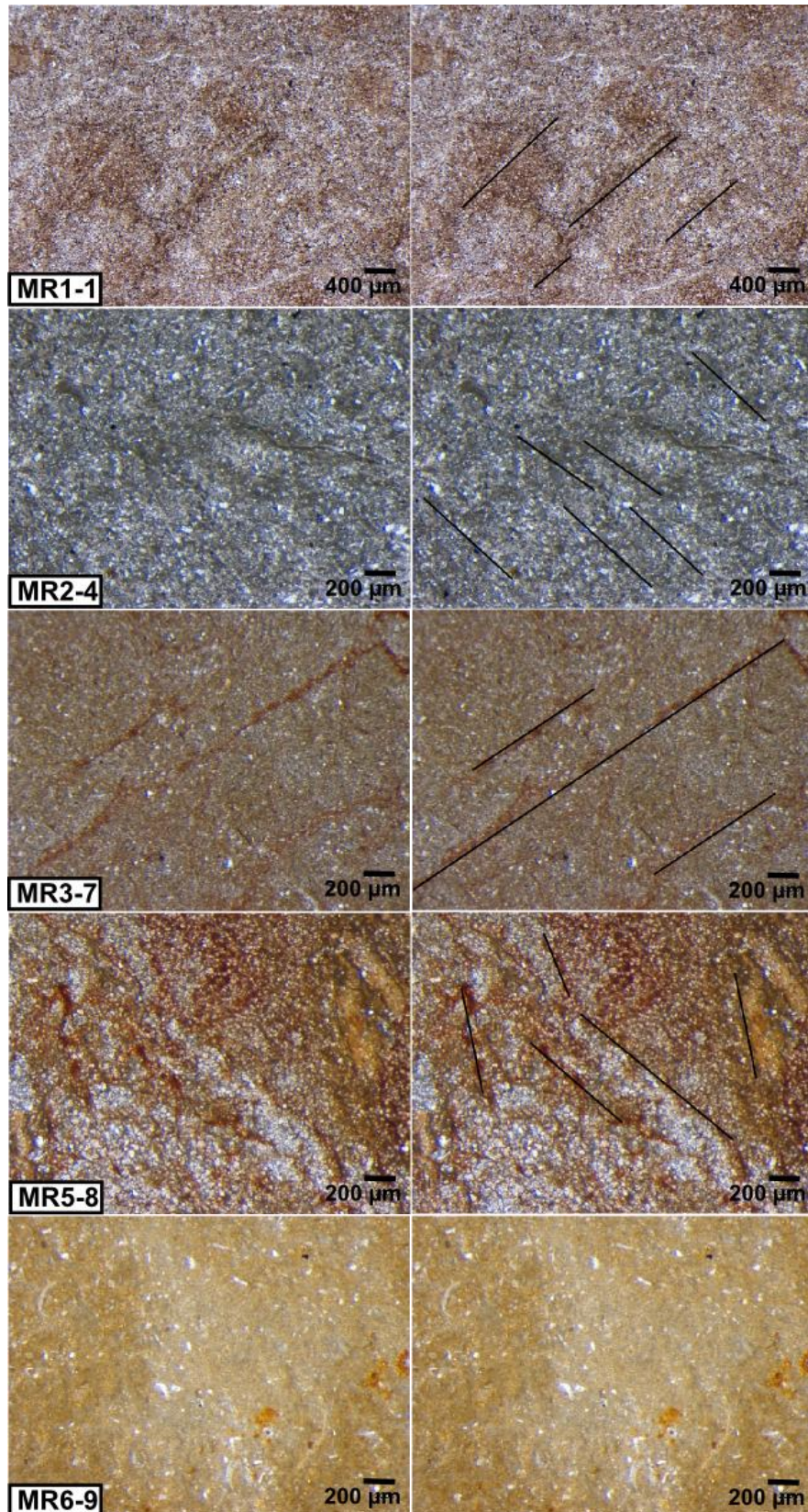


Figura 21. Fotografías de láminas delgadas cortadas perpendiculares al plano de foliación y a la lineación, con las estructuras que han sido observadas.

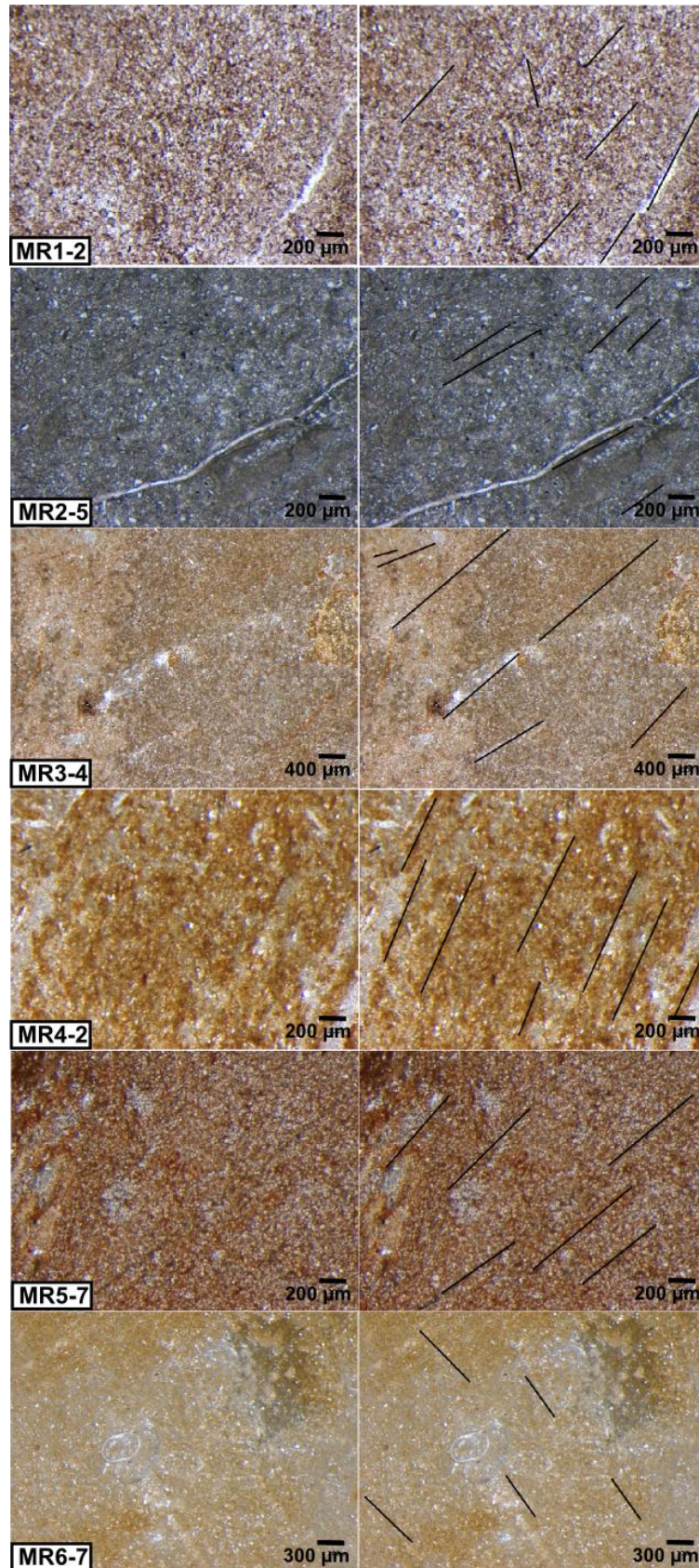


Figura 22. Fotografías de láminas delgadas cortadas perpendiculares al plano de foliación y paralelas a la lineación, con las estructuras que pueden interpretarse.

7. INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN

7. 1 Interpretación de la mineralogía portadora de la fábrica magnética

Debido a la problemática anteriormente explicada, los resultados de la mineralogía en este apartado se van a discutir por separado entre las muestras obtenidas de bloques y aquellas obtenidas de las estaciones.

Para aquellas muestras orientadas directamente en campo en estaciones, los resultados obtenidos mediante distintos métodos han resultado ser poco coincidentes.

Por una parte, como se ha indicado anteriormente, las curvas termomagnéticas indican la proporción entre las fases paramagnética y ferromagnética. Los resultados obtenidos han indicado una mineralogía magnética principalmente paramagnética (filosilicatos), cuya proporción ha resultado ser mayor o igual al 70% en todos los casos, representando en muchas ocasiones el 100% de la muestra, como sucede en las muestras MR0, MR2 y MR3 (tabla 3). Sin embargo, en algunas de las curvas termomagnéticas de ida se puede observar un pequeño pico, llamado pico de Hopkinson, alrededor de los 550°C, este pico localizado a la temperatura de 550°C es característico por indicar la presencia de magnetita, mineral ferromagnético. Esto sucede en las muestras MR1 y MR6. Seguramente este mineral se encuentre en muy baja proporción en las muestras, ya que de lo contrario, el pico de Hopkinson camuflaría la pendiente decreciente característica de la fase paramagnética. Sin embargo su presencia es muy importante aunque sea en poca cantidad, ya que se trata de un mineral con una susceptibilidad magnética muy alta, por lo que puede ser uno de los principales minerales portadores de la fábrica magnética aunque se encuentre en baja proporción. Para determinar la contribución de cada una de las fases, ferromagnética y paramagnética, en la fábrica magnética se deberían realizar análisis de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética a baja temperatura (LT-AMS) (Casas et al., 2016).

Los resultados obtenidos de la DRX para las muestras extraídas de las estaciones muestran proporciones de minerales tanto diamagnéticos como paramagnéticos. La presencia de minerales diamagnéticos es predominante ante los paramagnéticos en la mayoría de los casos, a excepción de la muestra MR5, donde los paramagnéticos representan el 64% del total de la muestra (tabla 4). Por otra parte, se ha detectado la

presencia de algunos minerales de los que no ha sido posible calcular un porcentaje. Este es el caso de la goethita en la muestra MR5. La goethita, al tratarse de un mineral ferromagnético, puede ser el mineral dominante en la fábrica magnética incluso encontrándose en muy baja proporción.

Cabe destacar en la muestra MR1, que es la que contiene mayor proporción fase ferromagnética según las curvas termomagnéticas, no se ha detectado ningún mineral ferromagnético en los resultados de la DRX. Esta mala correspondencia entre los resultados de ambos métodos también ocurre con la muestra MR5, en la que se ha detectado la presencia de goethita en la DRX, contiene un proporción muy baja de la fase ferromagnética según los resultados de las curvas termomagnéticas. Este problema se podría corresponder a que los resultados de la DRX no muestran algunos minerales ferromagnéticos que posiblemente se encuentran en las muestras, pero que, al ser tan baja su proporción respecto al total de la muestra, no han sido detectados. Para obtener resultados más precisos sobre la mineralogía de la muestra se deberían realizar análisis de difracción de rayos X de agregados orientados.

La observación de la mineralogía portadora de la fábrica magnética ha sido limitada debido al grano sumamente fino que presentan las muestras estudiadas, siendo imposible observar granos de filosilicatos con orientaciones preferentes tal como se esperaba de los resultados obtenidos por los métodos anteriormente descritos. Sin embargo, se han podido distinguir lineaciones de óxidos de Fe amorfos. Esto explicaría por qué la DFX ha dado resultados con mayor proporción de minerales paramagnéticos que las curvas termomagnéticas, ya que la DRX de muestras desorientadas no detecta minerales amorfos.

En general, la fase paramagnética parece ser la fase predominante en las muestras estudiadas, aunque, como se ha indicado anteriormente, la fase ferromagnética incluso encontrándose en muy baja proporción, podría tratarse de la mineralogía portadora de la fábrica magnética, tal como parecen indicar las observaciones en lámina delgada. De todas formas, para determinar con certeza esta cuestión, deberían realizarse análisis más detallados (Izquierdo-Llavall, 2015).

Por otra parte, la diferencia de los resultados sobre la mineralogía magnética en las muestras de bloques cortados en el laboratorio respecto a las muestras de especímenes extraídos directamente en campo, hizo sospechar desde un primer momento que era consecuencia de un error metodológico, ya que era muy difícil que la mineralogía magnética fuese tan distinta en rocas sedimentarias de la misma litología y extraídas a lo largo del mismo afloramiento de dimensiones relativamente pequeñas.

En los resultados obtenidos mediante las curvas termomagnéticas, las muestras de los bloques cortados en el laboratorio (B1, B2 y B3) indican que la fase ferromagnética es claramente mayor que la paramagnética, siendo la primera del orden del 100% para las muestras B1 y B2, excepto para la muestra B3, donde la fase ferromagnética representa el 35% de la mineralogía magnética total. En cambio, el valor de porcentaje obtenido del total de paramagnéticos mediante la DRX parece relativamente normal al compararlo con el resto de muestras, lo mismo con el resto de resultados obtenidos con este método.

La diferencia metodológica radica en el método de corte de los especímenes: en el caso de los bloques, estos fueron extraídos en el afloramiento y posteriormente cortados en el laboratorio con una sierra que refrigera con aceite, en cambio, los especímenes extraídos directamente en el afloramiento con una perforadora refrigerada con agua, posteriormente se cortó la longitud de los especímenes pero se usó otra sierra distinta que refrigera también con agua.

Como no se conservó ninguna parte de los bloques sin haber sido cortada, se resolvió poner en contacto un espécimen cortado directamente en campo en aceite y realizar análisis tanto de DRX como de curvas termomagnéticas para observar si se producía algún cambio. Se escogió un espécimen de la estación MR5, del cual se tenían ya datos sobre la mineralogía, y se impregnó con aceite a temperatura ambiente, esperando a que se secara por completo antes de realizar los análisis. La curvas termomagnética obtenida de esta muestra modificada (llamada MR5(1)) muestra claramente mayor proporción de la fase ferromagnética mucho mayor, tal como se puede observar en la figura 20, en contraste con el resultado obtenido en la muestra anteriormente (MR5).

El resultado de la mineralogía obtenido mediante la DRX para la muestra MR5(1) con respecto a la MR(5) muestra también cambios significativos. Por una parte, en la muestra MR5(1) la calcita y la clorita no se encuentran, mientras que para la muestra original (MR5) se obtenía un porcentaje relativamente importante en ambos minerales. Por otra parte, la proporción del cuarzo y de las micas aumenta en la muestra MR5.

No se conoce muy bien la razón por la cual la mineralogía cambia tal significativamente en las muestras que han entrado en contacto con el aceite. Se podría pensar que se produce algún cambio al subir de temperatura en las curvas termomagnéticas, sin embargo, los cambios también son también muy importantes en la DRX en los que no se ha producido ningún cambio de temperatura. Esta diferencia podría deberse a que el aceite, al ser ligeramente ácido, disuelve en cierta medida algunos minerales, cambiando en consecuencia la mineralogía portadora de la fábrica magnética. Este hecho no varía la orientación de los minerales, por lo que los resultados de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética no deberían verse afectados. Para determinar la causa con mayor certeza, deberían realizarse más comparaciones entre muestras que han entrado en contacto con aceite y las mismas muestras sin aceite o realizar otro tipo de análisis de la mineralogía más específicos. Esto abre una posible vía de investigación para estudiar las propiedades de diferentes aceites a partir de su comportamiento magnético en impregnaciones sobre distintos materiales geológicos.

7. 2 Orientación de foliación y lineación

Para determinar la orientación de foliaciones y lineaciones a lo largo de la zona de falla se han utilizado los resultados de la Anisotropía de la Susceptibilidad y datos estructurales tomados en el afloramiento.

El elipsoide de la ASM de todas las muestras tomadas a lo largo de la zona de falla, representado en la figura 13, muestra un buen agrupamiento de los ejes de susceptibilidad mínima (K3), que es el que coincide con la dirección media del polo de la foliación magnética. Esta orientación coincide también con la de la foliación por presión-disolución que se observa en el barranco de Entreflor.

La foliación magnética presenta una dirección aproximadamente ENE-WSW y tiene un buzamiento subvertical. La lineación magnética, se encuentra definida por el

agrupamiento de los ejes de susceptibilidad máxima (K1) y se encuentra distribuida en el plano de la foliación magnética, aunque con una media en torno a la horizontal. Esta dirección es perpendicular a la dirección de transporte, que en este caso es aproximadamente NNE (dirección de la cizalla en las superficies de cabalgamiento medidas en el barranco de Entreflor).

En cuanto a la gradación de la fábrica magnética a lo largo de la zona de falla, se ha representado a continuación, en la figura 23, un esquema de los resultados de los elipsoides de la ASM a lo largo del afloramiento.

En primer lugar, el eje de susceptibilidad mínima (K3) aparece en un primer momento (MR1) desagrupado (fábrica lineal), mientras que en los siguientes elipsoides (MR2, MR3, MR4 y MR5) se encuentra muy bien concentrado, para luego volver a desagruparse en los siguientes elipsoides obtenidos (MR6).

En este esquema se puede observar que a medida que se alejan del plano del cabalgamiento principal, los ejes K1 y K2 se dispersan en un plano generando una guirnalda, adquiriendo el elipsoide forma oblata, mientras que cerca del plano del cabalgamiento presenta forma triaxial.

La tendencia de los ejes K1 y K2 a dispersarse dentro del plano de foliación magnética, formando una guirnalda, a medida que nos alejamos del plano del cabalgamiento principal, con respecto a los elipsoides más próximos, podría indicar que la fábrica tectónica va adquiriendo mayor relevancia (transición entre lineación magnética paralela a la lineación de intersección y lineación magnética paralela a la dirección de transporte, (Dinarès y Parés, 1992). Por otra parte, el eje K3 parece estar dispersándose también en la estación más alejada del plano del cabalgamiento, pero en este caso podrían intervenir cuestiones litológicas.

Si bien es cierto que toda la zona en la que se han tomado muestras para la ASM se encuentra muy próxima al plano del cabalgamiento principal, en la parte más alejada se pueden comenzar a distinguir planos de estratificación (Cenozoico del bloque inferior). Si la concentración de los ejes K3 continuara disminuyendo aún más, significaría que la fábrica magnética comienza a ser deposicional, es decir, la primaria y anterior a la deformación tectónica. De todas formas, cabe destacar que el elipsoide de la ASM

obtenido para la estación MR6 presenta unos resultados un poco distintos a la gradación que parecen presentar el resto de elipsoides a lo largo del afloramiento. Para determinar si la fábrica magnética comienza a ser de carácter deposicional hacia la zona más alejada del plano del cabalgamiento, se deberían tomar más muestras en esta zona y analizar la ASM.

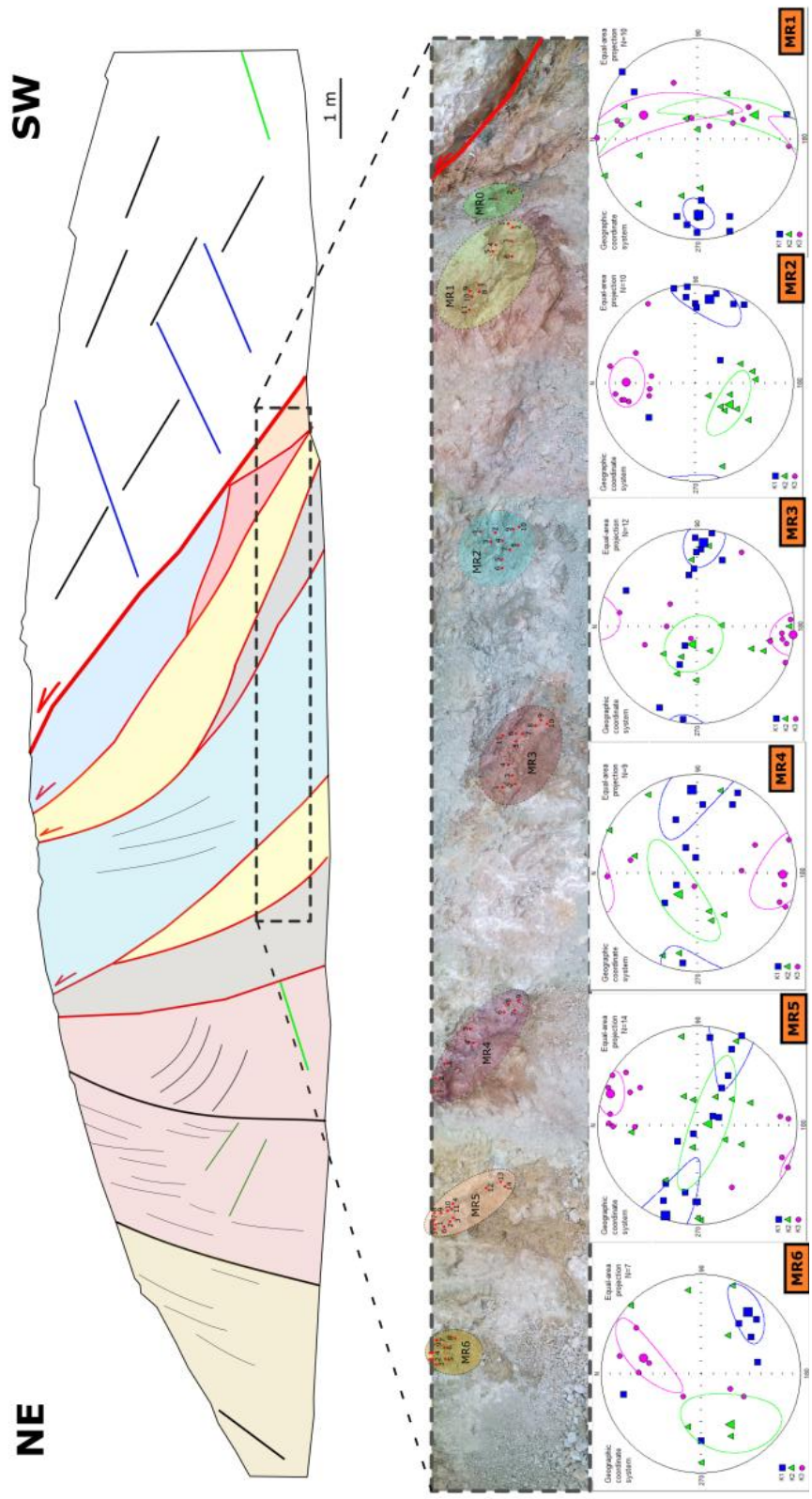


Figura 23. Esquema de los elipsoides de la ASM a lo largo de la zona de falla del afloramiento de Monroyo.

8. CONCLUSIONES

El estudio de la cinemática del cabalgamiento de Monroyo mediante la aplicación de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética y el análisis estructural tanto del afloramiento del cabalgamiento como de la zona circundante, ha permitido extraer las siguientes conclusiones:

- El cabalgamiento de Monroyo presenta una dirección ENE-WSW y dirección de transporte tectónico NNE. Esta información ha sido contrastada tanto por los resultados obtenidos de la ASM como el análisis estructural en el propio afloramiento del cabalgamiento y en las zonas circundantes.
- La dirección tanto del transporte tectónico como de la de las estructuras observadas coincide con el evento tectónico que provocó la elevación de la Cordillera Ibérica durante el Paleógeno-Neógeno en la zona de enlace.
- La gradación de la fábrica magnética a lo largo del afloramiento del cabalgamiento de Monroyo desde una lineación paralela a la lineación de intersección próxima al plano de cabalgamiento podría indicar o bien el paso de una fábrica tectónica a una fábrica primaria a medida que esta se aleja del plano del cabalgamiento principal, o que la deformación hacia la parte más alejada ha sido más relevante (transición a lineación paralela a la dirección de transporte).

Adicionalmente, mediante el estudio curvas termomagnéticas, difracción de rayos X (DRX) y la observación de láminas delgadas, se ha interpretado que:

- La mineralogía portadora de la fábrica magnética es la aportación de la fase ferromagnética, en concreto de óxidos de Fe observados en lámina delgada, y de la fase paramagnética por la presencia de filosilicatos en las rocas, detectados mediante curvas termomagnéticas y DRX.
- Los resultados de las curvas termomagnéticas y la DRX han resultado ser ambiguos, por lo que para conocer la contribución de cada una de las fases magnéticas en la mineralogía portadora de la fábrica magnética de las muestras se deberían realizar más estudios.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Borradaile, G. J., Henry, B. (1996). Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy. *Earth Science Reviews*, 42, 49 - 93.
- Canérot, J., Leyva, F. (1978). *Mapa geológico de España a escala 1:50.000 de la hoja nº 520 (Peñarroya de Tastavins) y memoria*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 42 pp.
- Casas-Sáinz, A. M., Román-Berdiel, T., Olivia-Urcia, B., García-Lasanta, C., Villalaín, J. J., Aldega, L., Corrado, S., Caricchi, C., Invernizzi, C., Osácar, M. C. (2016). Multidisciplinary approach to constrain kinematics of fault zones at shallow depths: a case study from the Cameros-Demanda thrust (North Spain). *Int J Earth Sci*, 1 – 33 (en prensa).
- Chadima, M., Hrouda, F. (2006). Cureval 8.0: thermomagnetic curve browser for windows. Agico, Inc, Brno.
- Chadima, M., Jelinek, V. (2009). Anisoft 4.2: anisotropy data browser for windows. Agico, Inc, Brno.
- Dinarès, J., Parés, J. M. (1992). Determinación de fábricas mediante la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) en rocas con diferente grado de deformación. Ejemplo de materiales eocenos de la cuenca de Ainsa (Pirineo Central). *Geogaceta*, 12, 22 – 25.
- González, A. (1989). *Análisis tectosedimentario del Cenoico del borde SE de la depresión del Ebro (sector bajoaragonés) y cubetas ibéricas marginales*. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 507 pp.
- Guimerà, J. (1988). *Estudi estructural de l'enllaç entre la Serrallada Iberica y la Serrallada Costanera Catalana*. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, 600 pp.
- Hrouda, F. y Janák, F. (1976). The changes in shape of the magnetic susceptibility ellipsoid during progressive metamorphism and deformation. *Tectonophysics*, 34, 135 - 148.

- Hrouda, F. (1982.) Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophysical Survey*, 5, 37 - 82.
- Izquierdo-Llavall, E., Casas, A. M., Oliva-Urcia, B., Pueyo, E. L. (2015). Estudio de fábricas magnéticas en las Sierras Interiores (Pirineo Central) y su relación con la deformación a diferentes escalas. *Geogaceta*, 58, 95 – 98.
- Parés, J. M, Van Der Pluijm, B. A. (2002). Evaluating magnetic lineations (ASM) in deformed rocks. *Tectonophysics*, 350: 283 - 298.
- Tarling, D. H., Hrouda, F. (1993). *The magnetic anisotropy of rocks*. Chapman and Hall, London, 217 pp.